



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Grado en Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE AIRBAGS PARA LA PROTECCIÓN DE UNA TABLET

Autor: Wilman Daniel Chávez Carcelén

Tutor: Prof. Dr. Ramón Eulalio Zaera Polo

***DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y
TEORÍA DE ESTRUCTURAS***

Leganés, septiembre de 2018

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a la Universidad y a mi tutor Ramón por darme la oportunidad de poder realizar este trabajo, por su implicación, por su paciencia, por las horas de tutorías y todos los correos atendidos. Gracias a Ramón he podido ampliar mis conocimientos del funcionamiento del Método de los Elementos Finitos en softwares como Abaqus.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a todos los compañeros con los que he tenido el placer de coincidir en la carrera, en especial a aquellos que los considero amigos, por aceptarme tal y como soy y por todas las experiencias inolvidables que hemos vivido.

Por último, pero no menos importante, a mi familia, por el apoyo que he recibido por su parte durante todos estos años. Gracias sobre todo a mis padres Wilman y Alba, que nunca dudaron en que podía con este reto, que me ayudaron con todo lo que estaba en sus manos y que me apoyaron incluso cuando las cosas no iban bien.

Resumen

El trabajo consiste en el análisis y optimización de un sistema de airbags para la protección de una Tablet en un impacto contra el suelo. Este proceso se realiza utilizando el software de simulación mediante elementos finitos llamado Abaqus, se trata de un estudio iterativo que tiene como principal objetivo la reducción del pico de aceleración en un punto característico de la Tablet.

En primer lugar, se introduce al mundo de los sistemas de empaquetamiento y embalaje, desde sus principios hasta la actualidad, desde lo más general hasta lo más particular, la tecnología que se usa para su fabricación y su influencia en la industria.

El proceso de optimización consiste en la simulación del impacto contra el suelo de varios modelos modificando únicamente la geometría de los airbags hasta encontrar un modelo final, posteriormente se realiza una optimización avanzada del modelo final variando parámetros significativos como la presión interna de los airbags o la altura de caída del cuerpo.

El trabajo concluye con un análisis de los resultados obtenidos, unas conclusiones sobre estos resultados y el proyecto en general, y una propuesta de trabajos futuros.

Palabras clave: Airbags; Empaquetamiento; Abaqus; Aceleración.

Abstract

The project consists in the analysis and optimization of an airbag system for the protection of a Tablet in an impact against the ground. This process is done using a finite element simulation software called Abaqus, it is an iterative study whose main objective is the reduction of the acceleration peak at a characteristic point of the Tablet.

First, it is introduced to the world of packaging and packaging systems, from its beginnings to the present, from the most general to the most particular, the technology used for its manufacture and its influence in the industry.

The optimization process is based on the simulation of the impact against the ground of several models changing only the geometry of the airbags until getting a final model. Subsequently, an advanced optimization of the final model is made changing significant parameters, such as the internal pressure of the airbags or the height of the body's fall.

The project concludes with an analysis of the obtained results, the conclusions about these results and the entire project, and a proposal of future projects.

Keywords: Airbags; Packaging; Abaqus; Acceleration.

Índice de Contenido

1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
2. ANTECEDENTES.....	2
2.1 EL PAPEL Y SUS VARIANTES	2
2.2 EL VIDRIO	4
2.3 EL METAL	5
2.4 EL PLÁSTICO O MATERIAL FLEXIBLE	7
2.5 MATERIALES COMPUESTOS O MULTICAPAS	10
2.6 USO DE AIRBAGS PARA EMPACAR	10
3. METODOLOGÍA	13
3.1 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)	13
3.2 MEF EN MECÁNICA DE SÓLIDOS	15
3.2.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO	16
3.3 BASES DEL MODELADO MEDIANTE EF.	17
3.3.1 IDEALIZACIÓN	17
3.3.2 DISCRETIZACIÓN.....	17
3.3.3 ATRIBUTOS DE LOS ELEMENTOS	18
3.3.4 ENSAMBLAJE	18
3.3.5 CONDICIONES DE CONTORNO	19
3.4 SOFTWARES DE ELEMENTOS FINITOS.....	19
3.5 INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE ABAQUS.....	19
4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE EF	21
4.1. DISEÑO	21
4.1.1 TABLET	22
4.1.2 SUPERFICIE “SUELO”	25
4.1.3 AIRBAGS	26
4.2 GAS INTERNO	30
4.3 CONTACTOS	30
4.3.1 CONTACTO AIRBAG-TABLET	31
4.3.2 CONTACTO AIRBAG-AIRBAG	31
4.3.3 CONTACTO “CUERPO”- “SUELO”	31
4.4 CONSIDERACIONES IMPORTANTES.....	32
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	34
5.1 PRIMER MODELO	34
5.2 SEGUNDO MODELO	36
5.3 TERCER MODELO.....	37
5.4 CUARTO MODELO.....	39
5.5 QUINTO MODELO	40
5.6 SEXTO MODELO (FINAL).....	41
5.7 OPTIMIZACIÓN DEL MODELO FINAL.	43
5.7.1 VARIACIÓN DE LA PRESIÓN INTERNA.....	43
5.7.2 VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE ELEMENTO DEL MALLADO DE LOS AIRBAGS.	45
5.7.3 VARIACIÓN DE LA ALTURA DE CAÍDA.	47
5.7.4 ANÁLISIS DE UN IMPACTO LATERAL.	48

6. PRESUPUESTO	50
7. ENTORNO SOCIOECONÓMICO.	51
8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	52
8.1 CONCLUSIONES.....	52
8.2 TRABAJOS FUTUROS	53
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

Índice de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1: FÁBRICA DE PAPEL DEL SIGLO XV.	3
ILUSTRACIÓN 2: TIPOS DE CAJAS SEGÚN SU FORMA.	4
ILUSTRACIÓN 3: ALFARERÍA EGIPCIA.	4
ILUSTRACIÓN 4: UNO DE LOS PRIMEROS ENVASES DE VIDRIO TRANSPARENTE.	5
ILUSTRACIÓN 5: ENVASES DE HOJALATA DEL SIGLO XIX.	6
ILUSTRACIÓN 6: LATAS DE 2 PIEZAS.	6
ILUSTRACIÓN 7: PUBLICIDAD DEL STYRON DE LOS AÑOS 40.	8
ILUSTRACIÓN 8: MATERIALES QUE RECUBREN LOS CABLES ELÉCTRICOS.	9
ILUSTRACIÓN 9: COMPOSICIÓN EN LÁMINAS DE UN ENVASE DE TETRAPAK.	10
ILUSTRACIÓN 10: ESQUEMA DE LA PATENTE US5445274A.	11
ILUSTRACIÓN 11: INFLADO DE AIRBAGS CON VÁLVULAS DE RETENCIÓN.	11
ILUSTRACIÓN 12: ESQUEMA DE LA PATENTE US6913803B2.	12
ILUSTRACIÓN 13: MÁQUINA PARA EL INFLADO DE AIRBAGS SIN VÁLVULAS DE RETENCIÓN.	12
ILUSTRACIÓN 14: EJEMPLO DE MALLADO DE UN DOMINIO V:	13
ILUSTRACIÓN 15: FASES DEL PROCESO DE MODELADO MEDIANTE EF.	18
ILUSTRACIÓN 16: CREACIÓN DE LA "PART" TABLET.	23
ILUSTRACIÓN 17: TIPO DE ELEMENTO DE MALLADO DE LA TABLET.	23
ILUSTRACIÓN 18: MALLADO DE LA TABLET.	24
ILUSTRACIÓN 19: ASIGNACIÓN DEL NODO CDG Y LAS VARIABLES A ANALIZAR.	24
ILUSTRACIÓN 20: CREACIÓN DE LA SUPERFICIE "SUELO".	25
ILUSTRACIÓN 21: ASIGNACIÓN DE LA CONDICIÓN DE RESTRICCIÓN DE LA SUPERFICIE "SUELO".	26
ILUSTRACIÓN 22: CILINDRO BASE.	26
ILUSTRACIÓN 23: SÓLIDO AUXILIAR.	26
ILUSTRACIÓN 24: DESPLAZAMIENTOS DE LOS SÓLIDOS AUXILIARES.	27
ILUSTRACIÓN 25: AIRBAG SUPERIOR Y AIRBAG LATERAL.	27
ILUSTRACIÓN 26: CREACIÓN DE LAS SUPERFICIES DEL AIRBAG.	28
ILUSTRACIÓN 27: SECCIÓN DEL ELEMENTO AIRBAG.	28
ILUSTRACIÓN 28: TIPO DE ELEMENTO Y MALLADO DE LOS AIRBAGS.	28
ILUSTRACIÓN 29: GENERACIÓN DE LA TABLET Y LOS AIRBAGS EN "ASSEMBLY".	29
ILUSTRACIÓN 30: GENERACIÓN DEL SISTEMA COMPLETO.	29
ILUSTRACIÓN 31: PROPIEDADES Y PRESIÓN DEL GAS INTERNO.	30
ILUSTRACIÓN 32: INTERACCIÓN DE TIPO CAVIDAD FLUIDA.	30
ILUSTRACIÓN 33: COACCIÓN AIRBAG-TABLET.	31
ILUSTRACIÓN 34: COACCIÓN AIRBAG-AIRBAG.	31
ILUSTRACIÓN 35: PROPIEDADES E INTERACCIÓN DEL CONTACTO CUERPO-SUELO.	32
ILUSTRACIÓN 36: VELOCIDAD INICIAL DEL CUERPO.	32
ILUSTRACIÓN 37: MOMENTO CRÍTICO DEL IMPACTO DEL PRIMER MODELO.	34
ILUSTRACIÓN 38: VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN EN EL TIEMPO DEL PRIMER MODELO.	35
ILUSTRACIÓN 39: MOMENTO CRÍTICO DEL IMPACTO DEL SEGUNDO MODELO.	36
ILUSTRACIÓN 40: VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN EN EL TIEMPO DEL SEGUNDO MODELO.	36
ILUSTRACIÓN 41: MOMENTO CRÍTICO DEL IMPACTO DEL TERCER MODELO.	38
ILUSTRACIÓN 42: VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN EN EL TIEMPO DEL TERCER MODELO.	38
ILUSTRACIÓN 43: MOMENTO CRÍTICO DEL IMPACTO DEL CUARTO MODELO.	39
ILUSTRACIÓN 44: VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN EN EL TIEMPO DEL CUARTO MODELO.	39
ILUSTRACIÓN 45: MOMENTO CRÍTICO DEL IMPACTO DEL QUINTO MODELO.	40
ILUSTRACIÓN 46: VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN EN EL TIEMPO DEL QUINTO MODELO.	41
ILUSTRACIÓN 47: MOMENTO CRÍTICO DEL IMPACTO DEL SEXTO MODELO.	42
ILUSTRACIÓN 48: VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN EN EL TIEMPO DEL SEXTO MODELO.	42
ILUSTRACIÓN 49: VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN CON UNA PRESIÓN INTERNA DE 5000 PA.	43

ILUSTRACIÓN 50: VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN CON UNA PRESIÓN INTERNA DE 20000 PA.	43
ILUSTRACIÓN 51: VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN CON UNA PRESIÓN INTERNA DE 40000 PA.	44
ILUSTRACIÓN 52: VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN CON UNA PRESIÓN INTERNA DE 60000 PA.	44
ILUSTRACIÓN 53: VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN CON UNA PRESIÓN INTERNA DE 80000 PA.	44
ILUSTRACIÓN 54: ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD DE LA MALLA.	46
ILUSTRACIÓN 55: VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN UTILIZANDO 20000PA Y 0.0025 DE SEED.....	47
ILUSTRACIÓN 56: VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL MODELO FINAL.	48
ILUSTRACIÓN 57: MOMENTO CRÍTICO DEL IMPACTO LATERAL DEL MODELO FINAL.	48
ILUSTRACIÓN 58: VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN EN EL IMPACTO LATERAL DEL MODELO FINAL.	49

Índice de Tablas

TABLA 1: SIGNIFICADO DE $\{U\}$ Y $\{F\}$ EN VARIAS APLICACIONES DEL MEF.	14
TABLA 2: RESUMEN DEL DISEÑO DE LA TABLET.	25
TABLA 3: RESUMEN DEL DISEÑO DE LOS AIRBAGS.	29
TABLA 4: RESULTADOS DEL PRIMER MODELO.	35
TABLA 5: RESULTADOS DEL SEGUNDO MODELO.	37
TABLA 6: RESULTADOS DEL TERCER MODELO.	38
TABLA 7: RESULTADOS DEL CUARTO MODELO.	40
TABLA 8: RESULTADOS DEL QUINTO MODELO.	41
TABLA 9: RESULTADOS DEL SEXTO MODELO.	42
TABLA 10: RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA RESPECTO A LA PRESIÓN INTERNA DEL AIRBAG.	45
TABLA 11: VARIACIÓN DEL PICO DE ACELERACIÓN RESPECTO AL TAMAÑO Y NÚMERO DE ELEMENTOS DEL MALLADO.	46
TABLA 12: VALORES DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA RESPECTO A LA ALTURA DE CAÍDA.	47
TABLA 13: TIEMPO APROXIMADO PARA LA DEGRADACIÓN DE LOS MATERIALES PARA ENVASAR.	51

1. Motivación y Objetivos

1.1 Motivación

Los sistemas de empaquetamiento y embalaje han sido muy importantes en el desarrollo de la sociedad, las personas por lo general siempre intentan conservar lo mejor posible sus bienes materiales, ya sea para almacenarlos o transportarlos. Queda demostrado que si lo empaquetas se conserva mucho mejor a lo largo del tiempo.

La idea del trabajo es diseñar un sistema de airbags de polietileno para empaquetar y proteger una Tablet. Esta idea surge debido a la abundancia de este tipo de aparato electrónico en la sociedad moderna, aparato que, como bien se sabe, es muy frágil y en muchos casos de elevado coste; es aquí donde surge la necesidad de protegerlo.

Para satisfacer esta necesidad, en este trabajo se presenta un estudio iterativo de varios diseños de airbags del mismo material para proteger a la Tablet de un caso aproximado a la realidad de impacto contra el suelo.

Cabe destacar que, en Tablets nuevas, el producto suele ir empaquetado en su respectiva caja, en este caso el sistema de airbags propuesto serviría para proteger la caja en la que se encuentra la Tablet. En el resto de los casos, la intención es proporcionar un sistema para proteger el aparato en situaciones de la vida cotidiana como por ejemplo una mudanza.

1.2 Objetivos

Además de los objetivos que plantea la Universidad para la realización del TFG como pueden ser, desarrollar aún más la capacidad de buscar información sin recurrir al plagio o administrar bien esta información y representarla de una forma clara y concisa.

El objetivo principal de este trabajo es que, mediante un proceso de ensayo y error, generar un sistema de airbags que garantice la protección de una Tablet en una situación de impacto por caída. Este proceso iterativo consta de una serie de simulaciones de modelos de diferente geometría sometidos a una velocidad constante de caída. La primera etapa del objetivo es desarrollar una geometría de los airbags óptima para finalizar con un análisis avanzado de este.

El trabajo también plantea varios objetivos personales, estos son:

- Elevar el conocimiento acerca de los sistemas de empaquetamiento y embalaje, su evolución, los materiales más usados, etc.
- Mejorar lo aprendido en la carrera acerca del Método de Elementos Finitos y sus aplicaciones en Mecánica de Sólidos.
- Adquirir conocimientos sobre el software Abaqus y saber diseñar y simular modelos estructurales con fluencia.
- Adquirir conocimiento acerca de airbags de polietileno, su comportamiento a esfuerzos, resistencias, desplazamientos, ...
- Interpretar correctamente los resultados y aplicarlos a una situación real próxima.

2. Antecedentes

El empaque o envase tiene muchas definiciones dependiendo del punto de referencia del que se observe, unos lo definen como aquello que posibilita la comunicación entre el fabricante y el cliente, otros, como el elemento que siempre ha estado presente, pero sin destacar, el empaque se lo conoce como el “vendedor silencioso” que puede llegar a convertirse en el principal vendedor, es el medio que ayuda a reflejar la imagen que el fabricante quiere grabar en la mente del consumidor.

Con el objetivo principal de conservar y proteger, con el paso del tiempo y en conjunto con la evolución de la tecnología, se han creado sistemas de empaquetamiento innovadores en base a un consumidor más exigente. La palabra inglesa *packaging* es un reflejo de esto, una palabra con connotación especial que, además de los conceptos de empaque, embalaje y diseño, se le ha ido añadiendo con el paso del tiempo funciones como la comunicación, que se permita su venta o utilizar marcas para identificar a los fabricantes.

La historia del empaquetamiento ha ido a la par con la historia del hombre, ya desde el año 8000 a.C. se utilizaban envases naturales formados por hierbas entrelazadas y vasijas de barro sin cocer. Más tarde los griegos y romanos empezarían a utilizar la tela como material, barriles de madera y botellas, tarros y urnas de barro cocidos. [1]

La historia de los envases se rige por la utilización de los materiales para su fabricación, distinguiendo 4 grandes grupos que han ido evolucionando con el paso del tiempo: el papel, el vidrio, el metal y el plástico.

2.1 El papel y sus variantes

El papel fue la forma más simple y antigua que se usó para envasar, ya en tiempos de antes de nuestra era se utilizaba las hierbas entrelazadas, hojas de palma para envolver productos de granja. La primera forma de envase de papel tratado fue con la utilización de la hoja de corteza de morera preparada por los chinos en el año 200 a.C. En esta época se fabricaron los primeros toneles y barriles de madera para almacenar y transportar vino, aceite y agua.

En el año 750 d.C. los griegos y romanos ya utilizaban botas y barriles de madera, sin embargo, la fabricación del papel llegaría a Oriente Medio y con ellos su expansión por toda Europa. Primero pasa por Italia y Alemania, a España la fabricación de papel llega el año 1200 pasando luego por Francia y Gran Bretaña en 1310.

En 1500 se imprimen las primeras etiquetas de papel y se utilizan los sacos de fique y yute¹ gracias al descubrimiento de américa. El envoltorio impreso más antiguo que se conoce data de 1550 por Andreas Bernhardt en Alemania.

¹ el fique y yute son fibras 100% naturales y ecológicas procedentes del sur de américa que, además de empaque, se utilizan como abono o alimento.

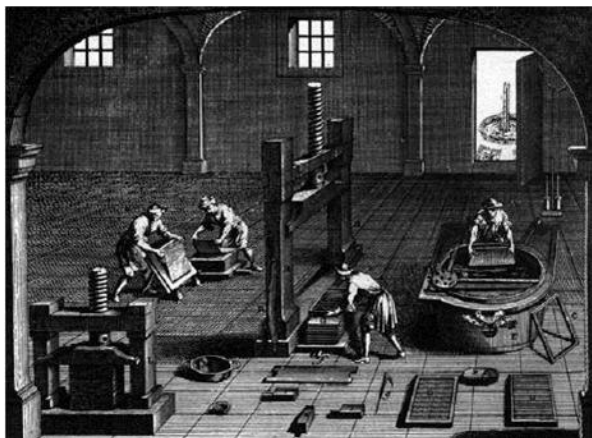


Ilustración 1: Fábrica de papel del siglo XV.

En 1700 llega a Estados Unidos las técnicas de fabricación del papel. Poco después en 1798, Luis Robert, un obrero de una fábrica francesa de papel, se hizo con una patente de una máquina que fabricaba papel de forma continua. [2]

A partir de 1841 con la invención de las cajas de cartón dobladas y cortadas a mano, con su éxito se logra desarrollar máquinas para la fabricación de cartón corrugado, seguido de las cajas de cartón impresas y las latas de cartón compuesto ya en 1905. Cabe destacar de esta época que, pese a su poca acogida, en 1852 gracias al botánico Francis Wolle se creó la bolsa de papel y la primera máquina para fabricarlas.

A lo largo del siglo XX el papel como material de empaque se ha visto opacado por el desarrollo de otros materiales como el plástico o el metal. Sin embargo, a partir de 1990 debido a la preocupación por la contaminación de los envases en los desechos, el uso del papel como material de empaque vuelve a crecer puesto que el papel se puede reciclar de forma sencilla.

En la actualidad, para la fabricación de papel para envasar se usan distintos procesos de adición en la mezcla de la pulpa, esto puede originar que el color cambie, sea resistente a la humedad, sea elástico, poroso, ... Características de gran utilidad, sobre todo estas dos últimas que hacen que el envase de papel pueda soportar grandes cargas.

El uso del papel para empacar se divide en: 80% Alimentos; 5% Cigarros; 5% Productos médicos y farmacéuticos; 5% Productos de papel (sobres); 3% Detergentes y productos de baño; 0.5% Productos químicos y para el campo; 0.5% Otros.

Algunos de los empaques con papel en la actualidad que más se utilizan son, por ejemplo; las bolsas de papel, su importancia en la industria sigue siendo alta ya sean para empacar azúcar en pequeñas porciones o para envasar productos farmacéuticos, en medicina el 80% de los envases de sus productos son de papel con algunos recubrimientos de plástico. En cuanto a su variante, el cartón, las cajas hechas con cartón corrugado ocupan un alto porcentaje en los sistemas de empaquetamiento.



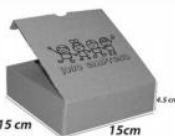

Cajas de una sola pieza o estándar.	 www.rapack.es
Cajas de dos piezas o telescópicas.	 www.trombini.com.br
Cajas de diferentes tipos de aletas: con aletas cortas, cruzadas, solapadas etc.	 15 cm 15 cm 4.5 cm www.eco-logica.co
Cajas de diseños especiales	 www.cartonajesteky.com

Ilustración 2: Tipos de cajas según su forma.

2.2 El vidrio

Por el año 4000 a.C. el vidrio ya estaba presente en la sociedad, un vidrio hecho mediante roca volcánica (Obsidiana), con ello se elaboraban vasijas y herramientas de caza como cuchillos, flechas y lanzas. No es hasta 1200 a.C. cuando el vidrio se impulsó en la industria del empaque gracias a la fabricación de las botellas en Egipto y Mesopotamia, se producía el vidrio claro con sílice pura y era coloreado con azul y verde y luego presionado en los moldes con formas de envases. En el año 300 a.C. cuando los Fenicios inventan el soplado del vidrio, la popularidad de los envases de vidrio aumentó ya que se podía fabricar envases redondos y cerrados.

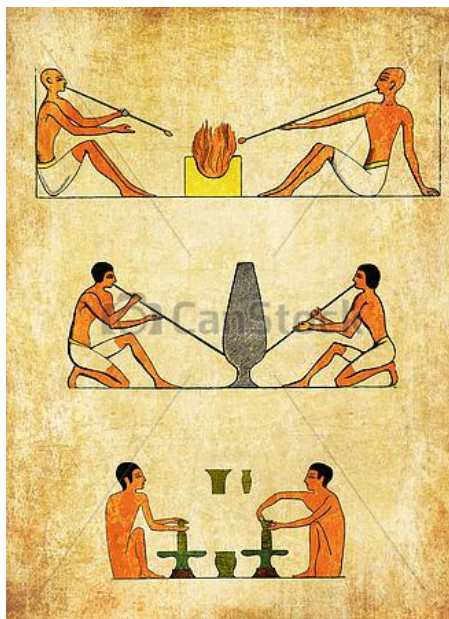


Ilustración 3: Alfarería egipcia.

Durante el Imperio Romano se asimilaron las técnicas de los egipcios y se desarrolló el vidrio transparente al incorporarle óxido de manganeso, con esta base se fabricaban botellas para el perfume, urnas, tarros y botellas para almacenar el vino, estas últimas se hicieron muy populares debido a que no modificaban el sabor del vino y por su transparencia se podía regular el consumo. A partir de esto, la producción de envases de vidrio se extendió a lo largo del imperio, desde el Mediterráneo hasta el Atlántico. [3]



Ilustración 4: Uno de los primeros envases de vidrio transparente.

A partir del siglo XIII se inician los grandes centros de fabricación de vidrio como la de Murano en Italia, luego en el siglo XVI la de Bohemia, en República Checa, centros que siguen activos en la actualidad.

La botella que conocemos hoy en día fue creada en Inglaterra por Kenelm Digby durante el año 1630, su técnica era utilizar un horno de carbón con un túnel de viento y una mayor proporción de arena de potasa y cal que lo habitual

Hasta el siglo XVIII el vidrio, como medio de almacenaje para alimentos y productos químicos, no tenía rival hasta que se inventó el bote de hojalata. Debido a su densidad, fragilidad y costos, la fabricación de envases de vidrio se vio reducido dando paso a los envases de metal y plástico. No es hasta 1990 que el vidrio retoma importancia en la industria gracias a la revolución “verde” y la preocupación por el medio ambiente, puesto que algunas de las cualidades en las que destaca el vidrio como método de empaque son: el material es natural, abundante y reciclable, es impermeable al paso de los gases, es inodoro, es higiénico con fácil limpieza, es resistente a presiones internas y altas temperaturas, la facilidad de moldeado lo hace muy versátil y además añade prestigio e imagen al producto.

Hoy en día el envase de vidrio lidera segmentos de la industria agroalimentaria como el vino, cava o la cerveza, y en algunos segmentos como los refrescos, aguas, zumos o conservas comparte popularidad con otros materiales como el plástico.

2.3 El metal

En 1775, con Francia en guerra, Napoleón ofreció 12.000 francos al ciudadano que desarrollara un método para conservar los alimentos y transportarlos durante las campañas. Durante los siguientes 15 años Nicolás Appert desarrolló un sistema que podía extender la vida del alimento indefinidamente, consistía en que colocaba los alimentos después de una cocción parcial en botellas de vidrio tapadas con corcho y sujeto con alambres, botellas que se sometían a un calentamiento en agua hervida por mucho tiempo, este sistema representó el inicio de la industria de las conservas.

En 1810 Appert ganó el premio y publicó el libro “El arte de conservar durante varios años todas las sustancias animales y vegetales”, sin embargo, poco después en 1814 la fábrica que había construido con el dinero del premio fue incendiada, y aunque su descubrimiento tuvo mucho éxito, no registró la patente anteponiendo sus propios intereses.

A su vez en Inglaterra (1810), Peter Durand presenta al registro una patente que consiste en un vaso de hojalata; un cilindro cerrado por ambos extremos mediante soldadura, hecho de hierro y recubierto de estaño. La hojalata presentaba mejoras frente al vidrio usado por Appert: más ligero, mayor rigidez, buen conductor del calor y es resistente a la corrosión. De esta forma Durand se convierte en el padre del envase metálico, poco después vendería su patente a Bryan Donkin y John Hall.

Después de un año de experimentos en 1813 Donkin y Hall enviaron latas de alimentos al ejército y la marina de Gran Bretaña, para el año 1818 la marina ya consumía 24.000 envases anuales.

Los ingleses que emigraron a América en 1817 introdujeron el envase metálico en Norteamérica, el primero fue Thomas Kensett, seguido en 1822 por William Underwood.



Ilustración 5: Envases de hojalata del siglo XIX.

Hubo que esperar hasta 1830 para que los alimentos enlatados apareciesen en las tiendas inglesas de forma habitual, lo primero que envasó fueron galletas y bizcochos en un envase sin decorar, hasta 1866 no se presentaron los primeros envases metálicos decorados.

Las latas de conservas fueron sumamente importantes durante las guerras permitiendo conservar alimentos y bebidas en envases herméticamente cerrados y esterilizados (1880). Con la finalización de las guerras mundiales, la producción de altos volúmenes deja de ser la prioridad y se retoman las mejoras e innovaciones como: las latas de aerosol (1945), bebidas carbonatadas en latas de hojalata (1948), las primeras latas de aluminio (1958) y el desarrollo de latas de 2 piezas fabricadas por embutición de la hojalata o del aluminio (1960-1970). [4]



Ilustración 6: Latas de 2 piezas.

En 1961 en Japón se empezó a utilizar la chapa cromada como otra opción ante la hojalata tradicional, la hoja de la chapa está compuesta por una base de acero a la cual se le hace un revestimiento con una capa de cromo metálico y después una capa de óxido de cromo, por último, se le añade una lámina de aceite que aísla el metal del contacto con el objeto a proteger. Este tipo de material es muy utilizado en conservas de vegetales y en la fabricación de las tapas de las botellas de las cervezas. [5]

Actualmente las hojas metálicas están hechas de aleaciones aluminio con una pureza superior al 93%, que es más caro y con menos resistencia mecánica que la hojalata, pero con grandes cualidades: es un metal muy ligero, buen conductor de la electricidad y el calor, se comporta bien a bajas temperaturas, es resistente a la sulfuración y reacciones químicas con la sustancia que contiene, es ergonómico y de fácil manipulación, resistente a la oxidación y no es magnético.

En cuanto a su reciclaje, su mayor ventaja es que la producción de una lata a partir de aluminio reciclado requiere un 95% menos de energía de la que sería necesaria para hacerla desde materiales vírgenes, esto lo hace muy llamativo para las empresas. [6]

El uso mundial del aluminio se divide en: 54% Embalajes; 38% Bandejas semirrígidas; 6% Laminación, construcción y etiquetas decorativas; 2% Recubrimiento de tapones y sellos.

2.4 El plástico o material flexible

El plástico, a diferencia de los anteriores materiales vistos, es un tipo de polímero sintético o artificial, similar en muchos aspectos a las resinas naturales que se encuentran en los árboles o las plantas. La primera persona que dio a conocer el plástico fue Alexander Parkes en Londres (1862), este material, llamado acetato de celulosa o celuloide, era un material orgánico que al calentarlo se podía moldear y conservaba su forma al enfriarse, Parkes aseguraba que era un material que podía hacer cualquier cosa que el caucho fuera capaz, pero a un precio menor. Este material se sigue usando actualmente con gran auge, sin embargo, por medidas ecológicas los investigadores buscan las mejores formas de reciclarlo para no bajar sus ventas.

En 1907 gracias al científico Leo Hendrik Baekeland se originó la primera sustancia plástica totalmente sintética a partir del alquitrán de hulla, denominó a este material “baquelita”, material que una vez formado no podía derretirse además era un buen aislante eléctrico. Baekeland fue el primero en acuñar a este tipo de materiales el término “plásticos”. [7]

Los primeros usos del acetato de celulosa y baquelita fueron con fines fotográficos, a partir de 1912 en Suiza empezaron a utilizarlo para fabricar envoltorios gracias al desarrollo del celofán (de las palabras “celulosa” y “diáfano”) por parte del químico Jacques E. Brandenberger. Varios años después en 1924 la empresa multinacional de origen estadounidense DuPont fabrica el primer celofán en Nueva York.

En 1927 el PVC, que había sido descubierto varias veces muchos años atrás, aparece por primera vez en el mercado como producto comercial. El poliéster fue adquirido por DuPont, empresa que abrió un laboratorio de investigación en 1929 para el desarrollo de materiales polímeros, reclutando a reconocidos académicos para guiar las investigaciones, entre ellos se encontraba Wallace Carothers que con la ayuda de su equipo descubrieron el neopreno en 1930, el nylon en 1935 y el teflón en 1938. [8]

Entre 1929 y 1931 en Alemania, gracias a Kurt Meyer y Herman Mark se desarrolló un reactor para la producción de poliestireno extruido en forma de gránulos, lo que se conocería como poliestireno genérico (PS) y se comenzó a fabricar piezas que anteriormente eran fabricadas en zinc. Con el paso de los años se empezó a producir estireno con alta pureza y bajo costo, en 1937 se fabricaba un poliestireno tan transparente que la gente pensaba que era cristal, el nombre comercial que le dieron fue Styron.



Ilustración 7: Publicidad del Styron de los años 40.

Las investigaciones siguieron y en 1943 se desarrolló el Styrofoam, una marca registrada de la espuma de poliestireno extruido de célula cerrada (XPS); hoy en día se usa como paneles aislantes de espuma. Un dato curioso es que las personas a menudo confunden el Styrofoam con el Styropor o poliestireno expandido (EPS), también conocido en España como poliespán, Porex pan o corcho blanco. [9]

Al igual que con el PVC, Nylon y la Baquelita, el Polietileno se descubre gracias a un “exitoso accidente” de la mano de Eric Fawcett y Reginald Gibson en los laboratorios de la Imperial Chemical Industries (ICI) en el año 1933, ambos trabajaban en experimentos con etileno sometido a altas presiones que tras contaminarse con oxígeno obtuvieron una sustancia blanca y cerosa. Sin embargo, no fue hasta 1935 que, gracias al químico de la ICI Michael Perrin, se desarrolló el que se conoce como Polietileno de baja densidad (LDPE), que fue patentado en 1936. Un año más tarde se desarrolló el Polietileno como película, y en 1939, año que inició de la II Guerra Mundial, empieza a usarse el polietileno en el recubrimiento de los cables eléctricos debido a su capacidad aislante y a su ligereza.

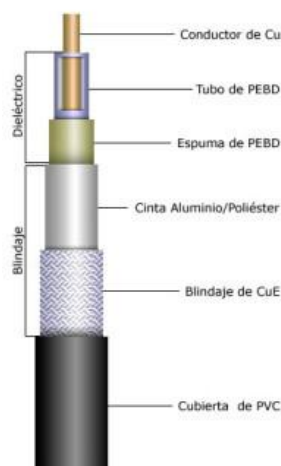


Ilustración 8: Materiales que recubren los cables eléctricos.

Cuando la guerra terminó, la ICI licencia a otras empresas como DuPont y la Union Carbide Corp para realizar avances en los laboratorios. En 1949 se desarrolló la primera bolsa tubular por soplado y, a principios de 1950 se descubrió un nuevo proceso para la síntesis de polímeros que permitió el desarrollo de nuevas cadenas de polímeros. Karl Ziegler desarrolló un catalizador (sustancia que acelera las reacciones químicas) que permitió la polimerización a temperatura ambiente y presión atmosférica normal, mediante esta técnica Ziegler creó el Polietileno de alta densidad (HDPE). [10]

A partir de 1976 se empieza a utilizar el PET (tereftalato de etileno) como material de envases rígidos, su popularidad se extendió gracias a la fabricación de botellas para bebidas poco sensibles al oxígeno como el agua mineral o los refrescos carbonatados. En la década de los 80 el uso del PET es más frecuente en envases multicapa de protección para empacar alimentos y productos como la mermelada.

Con la revolución “verde” los científicos se han centrado en buscar alternativas a materiales basados en el petróleo como el PET, una de estas alternativas es el uso del polietileno-furanoato (PEF) basado en el poliéster 100% biológico, un material que está de tendencia gracias a mejores propiedades de barrera: 10% más de protección al oxígeno, 4% más al dióxido de carbono y 2% más al vapor de agua. Además de una temperatura de transición vítrea mayor que lo hace apto para llenado en caliente y también es 100% reciclable. El PEF se desarrolla con la tecnología de catálisis YXY de Avantium, que convierte carbohidratos de las plantas en bloques químicos para la producción de bioplásticos, el uso habitual del PEF es en botellas para campos de cuidado personal y cuidado del hogar.

Una de las modernas innovaciones en la obtención de envases de plástico es el proyecto Nanopack en el que participa el Instituto Tecnológico del Plástico (AIMPLAS), en el cual trabajan con nanopartículas de arcillas y óxidos metálicos para incorporarlos en los materiales poliméricos, esta técnica mejora las propiedades de estos, hace innecesario la utilización de aditivos haciéndolos más seguros y se disminuye la utilización de materia prima lo que los hace sostenibles y competitivos. [11]

2.5 Materiales compuestos o multicapas

Los materiales compuestos son el resultado de la utilización de nuevas tecnologías en la creación de materiales para empaquetar, con el fin de conseguir mejores condiciones de protección y conservación del producto. Este tipo de materiales se consiguen con la unión de varios materiales complementándose entre sí y consiguiendo nuevas características de utilidad para todo lo que conlleva la industria del envasado. [5]

Uno de los casos más comunes es el envase de Tetrapak (nombre que se le dio debido a la empresa sueca que los empezó a fabricar), envase que en gran parte se utiliza para empaquetar bebidas lácteas y que aparenta ser de cartón pero que está compuesto por siete capas de diferentes materiales como se puede apreciar en la Ilustración 9.

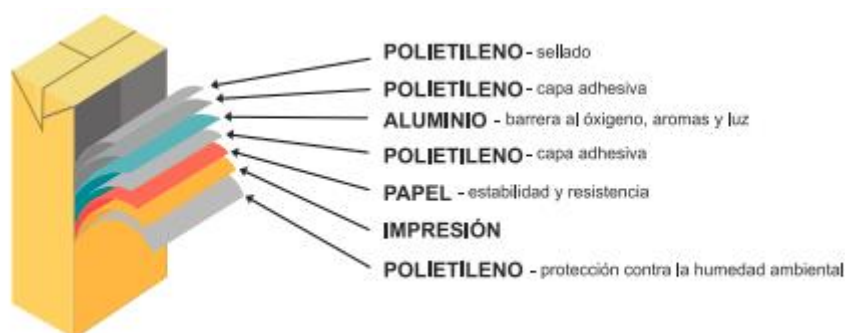


Ilustración 9: Composición en láminas de un envase de Tetrapak.

Existe una tendencia mundial a buscar la menor densidad en los materiales, obteniendo envoltorios más delgados y ligeros con bastante resistencia a la tracción. Otro de los objetivos prioritarios en las empresas es obtener materiales y procesos baratos por lo que el trabajo del diseñador debe ser fundamental, por ejemplo, el cierre de los envoltorios de plástico suelen cerrarse apretando con mordazas los extremos y fundiendo con calor las hojas al mismo tiempo; sin embargo, los contenidos como las variantes de chocolates no se pueden envolver con este proceso ya que se derretirían, en ese caso se suele utilizar un recubrimiento de cloruro de poli-vinilideno (PVDC) lo que permite sellar en frío a presión, se trata de un proceso más costoso.

El diseñador deberá tener en cuenta las propiedades del material, su complejidad y las tecnologías de su producción, asegurándose que el material escogido es compatible con el producto y las condiciones ambientales a las que estará expuesto, este procedimiento es fundamental en el envase de alimentos.

2.6 Uso de Airbags para empaquetar

El sistema de airbags para empaquetar consiste en una bolsa de tela o plástico que, a diferencia del plástico de burbujas, tienen una válvula de retención que permite el inflado y desinflado del airbag. Este tipo de empaquetamiento se empezó a desarrollar en la década de los 1970 y, en los años 1980 ya existía documentación sobre varios sistemas de airbags para la protección de objetos. [12]

Antes del año 2000, estos sistemas disponían solo de una válvula de retención lo que significaba que, si había un pinchazo o rotura en una parte del sistema, este se desinflaría en su totalidad. Un ejemplo es la patente **US5445274A**, inventado por Daniel Pharo en 1995 cuya finalidad consiste en mejorar

el empaquetamiento en cajas de cartón corrugado, cajas de madera y contenedores de acero, mediante bolsas flexibles diseñadas para adaptarse dentro del perímetro de la caja seguido de un inflado de los compartimentos de las bolsas para retener el producto y protegerlo. [13]

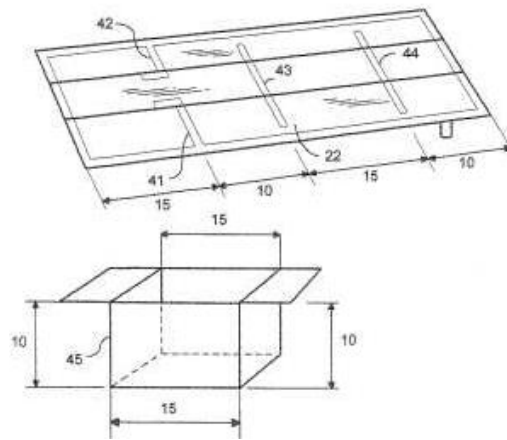


Ilustración 10: Esquema de la patente US5445274A.

Esto cambió en el 2002, cuando se diseñó un sistema continuo de válvulas unidireccionales e independientes, permitiendo que, si un airbag está perforado o roto, el resto del sistema se mantenga inflado.

El proceso de fabricación de los airbags empieza con la unión de 2 películas de polietileno, con las válvulas de retención en medio, mediante un prensado con un molde a alta temperatura que funde el polietileno y le da la forma al airbag. Con este proceso se puede obtener estilos y tipos de airbags variados.

Una de las ventajas de este sistema es que, la capa final se puede almacenar en rollos y, según sea la necesidad, se infla la cantidad deseada de airbags pudiéndose separar del resto gracias a la válvula que sella cada tubo de los demás una vez inflado. Otra ventaja importante es que la presión interna de los airbags es mucho mayor a la atmosférica, lo que proporciona una gran resistencia a la compresión y flexibilidad.

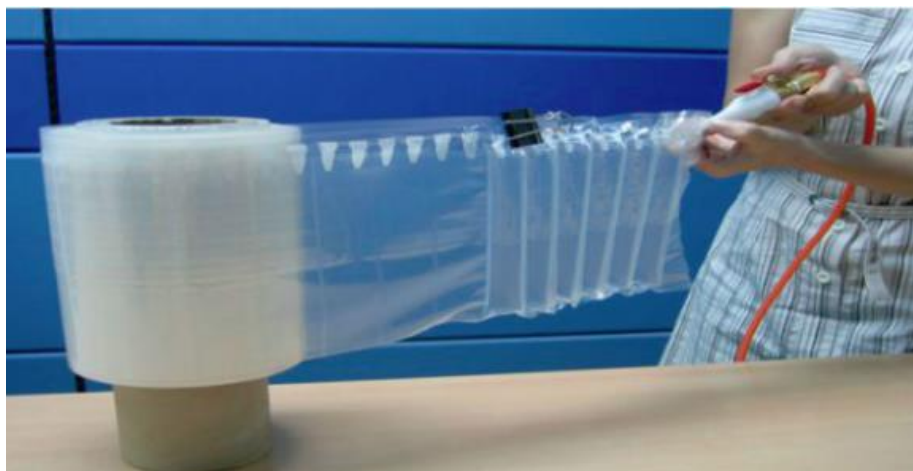


Ilustración 11: Inflado de airbags con válvulas de retención.

Otro método para fabricar este tipo de airbags es mediante la patente **US6913803B2**, inventada por William Peper en 2001 en el que forma una única válvula unidireccional mediante varias capas de polietileno, la primera capa se sella para formar el miembro inflable, una segunda capa se usa para formar una trayectoria de flujo serpenteante que conecta el interior del miembro inflable de la primera capa con una tercera capa mediante sellos, esta tercera capa es la que se utiliza para introducir el aire y, gracias a la presión que ejerce el aire, se forma una válvula unidireccional que comunica a los miembros inflables de forma escalada. [14]

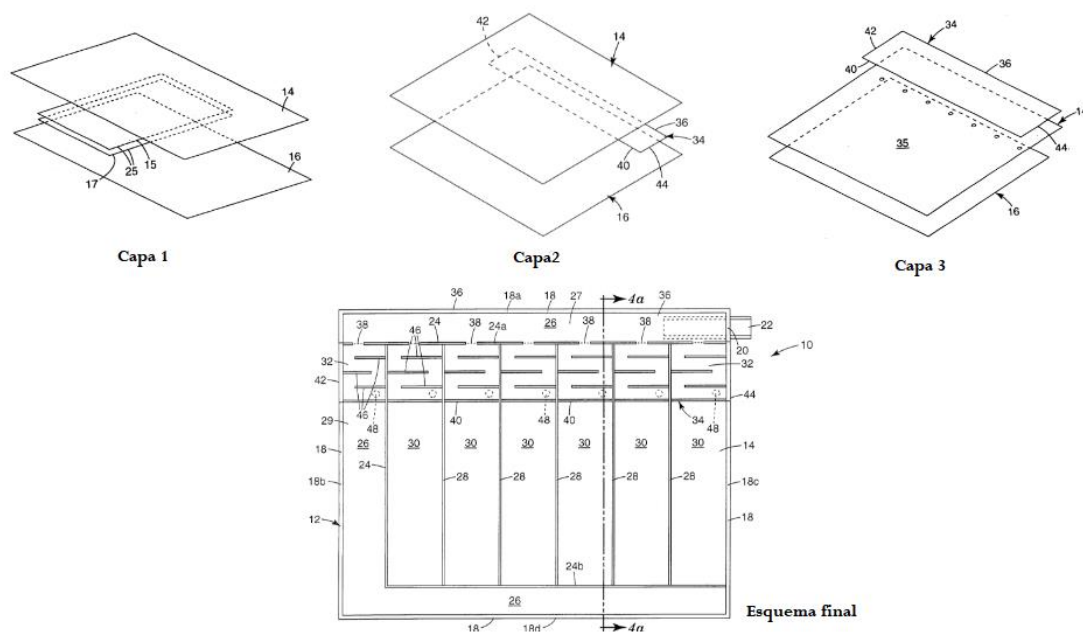


Ilustración 12: Esquema de la patente US6913803B2.

Hoy en día todavía se sigue usando airbags para empacar sin válvulas de retención debido a que es un sistema más barato de fabricar; sin embargo, para poder inflar los airbags se necesita una máquina como la de la Ilustración 13, que infla y sella los airbags al mismo tiempo y de forma continua. En cualquiera de los dos casos, lo habitual es que, las empresas que se dedican a fabricar este tipo de producto lo vendan en lotes o por rollos para poder obtener beneficios.

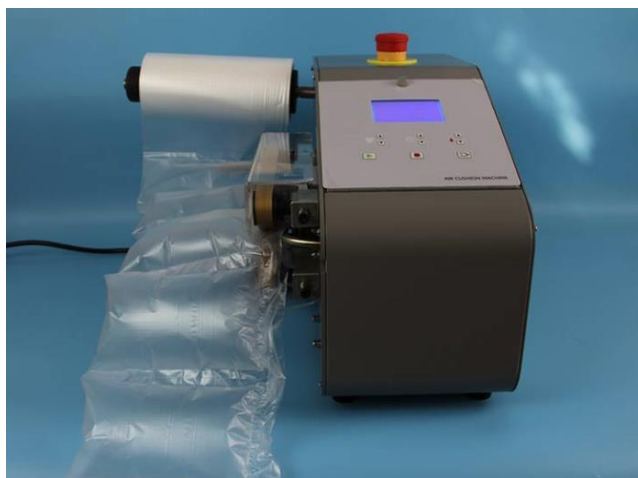


Ilustración 13: Máquina para el inflado de airbags sin válvulas de retención.

3. Metodología

El análisis ingenieril de sistemas mecánicos es abordado mediante la derivación de ecuaciones diferenciales relacionando las variables a través de principios básicos como el equilibrio, la conservación de la energía, la conservación de la masa, las leyes de la termodinámica, las ecuaciones de Maxwell y las leyes del movimiento de Newton. Sin embargo, una vez formulado, resolver los modelos matemáticos resultantes es a menudo imposible, especialmente cuando los resultados son ecuaciones diferenciales parcialmente no lineales.

La realización de este trabajo se centra en el análisis de modelos utilizando un software de simulación y análisis mediante el Método de Elementos Finitos llamado Abaqus. El objetivo de este apartado es explicar las bases del modelado mediante elementos finitos, así como el funcionamiento de Abaqus y algunas de sus principales características.

3.1 Método de los Elementos Finitos (MEF)

El método de los elementos finitos permite obtener el campo de una función o funciones de un modelo matemático mediante su división en varios subdominios utilizando funciones de aproximación local independientes en cada subdominio, e imponiendo condiciones de continuidad entre las funciones de aproximación de subdominios adyacentes. [15]

Estos subdominios son elementos pequeños y de simple geometría donde, cada uno de estos elementos es finito genérico y no se solapan entre ellos. Esta discretización se la conoce como mallado donde pueden identificarse puntos nodales, cada uno con una posición en el sistema global de coordenadas y que puede estar conectado con uno o varios elementos finitos del modelo.

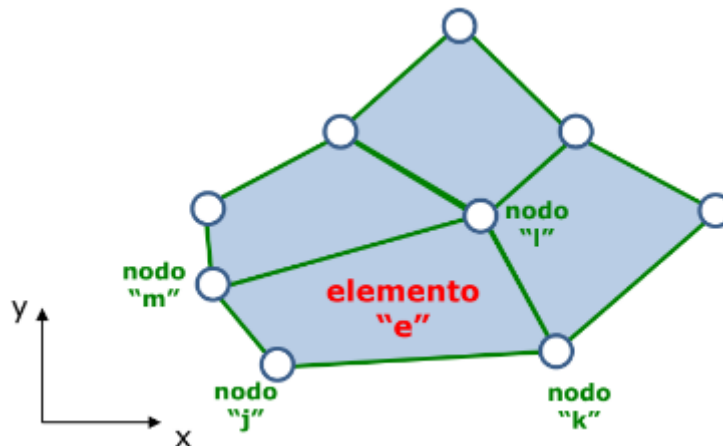


Ilustración 14: Ejemplo de mallado de un dominio V :

La aproximación local consiste en asignar a cada elemento finito funciones de interpolación que permitan calcular las componentes del vector de desplazamiento en el interior del elemento, a partir de los desplazamientos de los nodos conectados a ese elemento. De esta forma la respuesta del modelo matemático es una aproximación que se consigue conectando o ensamblando el conjunto de elementos que lo forman.

En un problema de elasticidad lineal, el funcionamiento del MEF se basa en hacer mínimo un funcional global asociado a la Energía Potencial Π , que es suma de funcionales locales de cada elemento finito y se expresa como:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} dV - \int_{\Omega} \mathbf{d}^T \mathbf{b} dV - \int_{\Gamma} \mathbf{d}^T \mathbf{q} dS \quad (3.1)$$

Donde $\boldsymbol{\sigma}$ y $\boldsymbol{\varepsilon}$ son los vectores de tensión y deformación respectivamente en cualquier punto, \mathbf{d} es el vector de desplazamiento en cualquier punto, \mathbf{b} es el vector de las fuerzas del cuerpo por unidad de volumen, y \mathbf{q} es el vector de tracción superficial aplicado en cualquier punto de la superficie.

El primer término de la ecuación representa la energía de tensión interna, el segundo y tercer término son las contribuciones de energía potencial generadas por las cargas volumétricas y superficiales respectivamente. [16]

Sustituyendo y derivando el funcional se reduce el problema a un sistema de ecuaciones algebraicas del tipo:

$$[K]\{u\} = \{f\} \quad (3.2)$$

Donde,

$[K]$ es la matriz de rigidez de la estructura.

$\{u\}$ es el vector de desplazamiento global.

$\{f\}$ es el vector de las fuerzas nodales externas.

Si $[K]$ y $\{f\}$ son constantes, es decir, si son independientes de $\{u\}$ entonces (3.2) es un sistema lineal de ecuaciones algebraicas.

El significado físico de los vectores $\{u\}$ y $\{f\}$ varía de acuerdo con la aplicación de nuestro modelo.

<i>Problema de aplicación</i>	<i>Vector de estado $\{u\}$</i>	<i>Vector conjugado $\{f\}$</i>
Estructuras y sólidos mecánicos	Desplazamientos	Fuerza mecánica
Conducción de calor	Temperatura	Flujo de calor
Fluido acústico	Potencial de desplazamiento	Velocidad de partícula
Flujo potencial	Presión	Velocidad de partícula
Flujo general	Velocidad	Flujos
Electrostática	Potencial eléctrico	Densidad de carga
Magnetostática	Potencial magnético	Intensidad magnética

Tabla 1: Significado de $\{u\}$ y $\{f\}$ en varias aplicaciones del MEF.

El MEF es un método muy útil en el ámbito de la ingeniería en el análisis estructural ya que permite crear un modelo matemático para realizar un cálculo basado en una situación real, la ventaja más importante de usar este método frente a un prototipo real es la facilidad de adaptación frente a los problemas. Sin embargo, es un método de solución aproximada y, es ahí donde el ingeniero es el encargado de buscar las posibles fuentes de error, deducir el error y estimarlo.

3.2 MEF en Mecánica de Sólidos

En comparación con el problema elástico, el problema elasto-plástico es mucho más complejo y costoso numéricamente debido a que, en el comportamiento elástico, las tensiones no son linealmente proporcionales a las deformaciones. La principal desventaja del problema elástico es que no todos los sistemas de ecuaciones diferenciales admiten la construcción de un funcional cuya minimización conduzca a una aproximación a la solución exacta.

En las aplicaciones prácticas, la limitación de la elasticidad lineal impide, a menudo, obtener una solución precisa debido a la presencia de efectos no lineales y/o porque la geometría tiene más de una dimensión.

En el caso plástico puede demostrarse, mediante la Teoría Incremental de la plasticidad, junto a la formulación basada en la existencia de un potencial de plastificación, que:

- Existe una relación general de proporcionalidad entre un incremento del tensor de tensiones y un incremento del tensor deformaciones:

$$d\sigma = D^{tan}:d\varepsilon \quad (3.3)$$

- El factor de proporcionalidad en esta relación entre incrementos varía, a su vez, en función del estado tenso-deformacional:

$$D^{tan} = D^{tan}(\sigma) \text{ o bien } D^{tan} = D^{tan}(\varepsilon)$$

- Este factor de proporcionalidad es un tensor de 4o orden, a veces denominado tensor de rigidez tangente del material:

$$d\sigma_{ij} = D^{tan}_{ijkl}d\varepsilon_{kl} \quad (3.4)$$

Donde,

D^{tan} es el tensor de rigidez tangente.

$d\sigma$ es el Tensor de Tensiones.

$d\varepsilon$ es el Tensor de Deformaciones.

Como $[D^{tan}]$ varía con la deformación, se puede intuir que si fuese posible encontrar un sistema de ecuaciones para aproximar la solución del problema elasto-plástico, este será del tipo:

$$[K^{tan}]\{x\} = \{f\} \quad (3.5)$$

Donde,

$[K^{tan}]$ es la matriz de rigidez tangente.

$\{x\}$ es el vector de desplazamientos.

$\{f\}$ es el vector de fuerzas nodales.

el sistema es no lineal puesto que $K^{tan} = K(x)$.

Existen varios métodos de formulación a partir del cual desarrollar los cálculos de elementos finitos, unos de los más famosos es el **Método de aproximación de Galerkin (formas irreducible y mixta)**. Este método sigue con la idea de discretización, añadiendo a su vez que el contorno del dominio del problema se divide en subdominios donde, una parte del contorno es donde se especifican las cargas repartidas y, la otra parte es donde se especifican los valores de los desplazamientos. La forma débil de las ecuaciones de gobierno se escribe para el dominio del problema y también como una suma sobre todos los dominios elementales.

En el fondo, en las formas mixtas algunas funciones no tendrán derivadas y éstas se podrán aproximar mediante funciones discontinuas en el dominio del problema, respetando el orden de aproximación donde una solución exacta puede tener un comportamiento discontinuo.

El método se apoya en la integración por cuadratura de Gauss y el método estándar de solución de Newton para resolver el problema algebraico no lineal resultante. [17]

La técnica de integración numérica de GAUSS-LEGENDRE, o Cuadratura de Gauss, consiste en sustituir la integración de una función, en un intervalo o región, por un cierto número de evaluaciones ponderadas de dicha función en puntos adecuadamente escogidos del intervalo o región.

La propiedad principal de la cuadratura de Gauss es que, en “n” evaluaciones recupera la solución exacta de la integración de un polinomio de grado $2n-1$. En el caso 1-D son n evaluaciones de la función a integrar, en el 2-D son n^2 evaluaciones... [18]

3.2.1 Hipótesis de trabajo

Cual sea el método de formulación que utilicemos para estudiar un elemento elasto-plástico mediante MEF, la mayoría de estos se desarrollan en base a las siguientes hipótesis:

- El material elasto-plástico con o sin endurecimiento por deformación.
- Se admite endurecimiento isótropo (expansión uniforme de la superficie de fluencia).
- No se admite endurecimiento cinemático (desplazamiento del centro del lugar de plastificación)
- Régimen cuasi-estático (se desprecian las fuerzas de inercia).
- Se admiten pequeños desplazamientos (circunstancia en la que las fuerzas externas no dependen del campo de desplazamiento y, por tanto, pueden calcularse en la configuración inicial, no deformada).
- Se admiten grandes deformaciones plásticas, pero pequeñas deformaciones elásticas. [19]

3.3 Bases del Modelado mediante EF.

3.3.1 Idealización

Esta fase del proceso corresponde con la transformación de un sistema físico a un modelo matemático, se trata de una práctica ingenieril que solo la puede realizar una persona ya que es un proceso diferente para cada caso y no se puede “almacenar” en una base de datos.

Para estos casos, la palabra “modelo” se define como un dispositivo simbólico construido para simular y predecir aspectos del comportamiento de un sistema.

Por lo tanto, se le llama **Idealización** porque el modelo matemático es necesariamente una abstracción de la realidad física, esto es debido a que, sobre todo en ingeniería mecánica y aeroespacial, esta realidad tiende a ser demasiado compleja y es necesario reducirla a proporciones manejables.

Cabe destacar que, en la mayoría de los libros sobre modelado mediante elementos finitos, no ofrecen una forma sistemática del desarrollo del modelado y pocas veces explican el concepto de modelado explícito e implícito, concepto que tiene implicaciones legales y profesionales.

El modelado implícito se basa, por ejemplo, en un escenario común en la industria como es el caso de analizar una estructura o una porción de esta. El programa del que dispones ofrece un catálogo de tipos de elemento: barras, vigas, placas, sólidos antisimétricos, sólidos generales en 3D, y mucho más. En el momento en el que se elige un elemento específico de este catálogo, se está automáticamente aceptando el modelo matemático en el cual estará basado el elemento.

En el otro extremo, tenemos el modelado explícito, que ocurre cuando se selecciona un modelo matemático a partir del problema físico utilizando sólo la vista, y luego buscar un programa de elementos finitos en el que se pueda implementar este modelo. Esta técnica requiere más habilidad técnica, experiencia y recursos que el modelado implícito. En la práctica, lo común es utilizar una combinación de modelado implícito y explícito.

3.3.2 Discretización

Convertir un sistema físico en un modelo matemático es un proceso de simplificación, pero, no quiere decir que el modelo es necesariamente simple de resolver, a menudo implican ecuaciones diferenciales parciales en un tiempo y espacio sujetos a condiciones de contorno e/o interfaz, algunos de ellos incluso tienen un número infinito de grados de libertad.

Un problema de modelado se puede resolver de forma analítica o numérica. Las soluciones analíticas son lo más próximo a la solución real, sin embargo, está restringida a geometrías regulares y condiciones de contorno simples. La mayoría de los problemas a los que hace frente un ingeniero no es posible resolverlos de forma analítica o, en el caso contrario de poder hacerlo, requerirá una cantidad enorme de esfuerzo.

La mejor forma de resolver estos problemas es mediante una simulación numérica, para hacerlo es necesario reducir el número de grados de libertad a un número finito, esta reducción se la conoce como **Discretización**, proceso cuyo producto es un modelo discreto. La discretización también puede utilizarse en las dimensiones del espacio y el

tiempo. La técnica de discretización que de lejos es la más usada es el Método de los Elementos Finitos (MEF).

Como se puede apreciar en la Ilustración 15, cada fase de la simulación introduce una fuente de error, analizar estos errores es de las tareas más importantes del ingeniero, sin embargo, estos errores son difíciles y costosos de evaluar dado que para validar un modelo requiere tener acceso a una comparación con un experimento real que, suelen ser escasos o si son nuevos y están en fase de diseño, no hay disponibilidad de estos.

En estos casos es donde toma importancia el error de discretización. La solución calculada del modelo discreto es, en general, solo una aproximación en cierto sentido a la solución exacta del modelo matemático, y cuando hay una medida cuantitativa de esta discrepancia se lo denomina error de discretización.

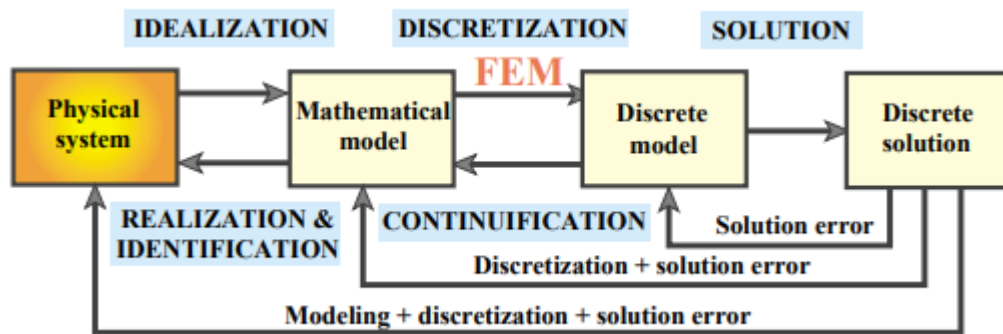


Ilustración 15: Fases del proceso de modelado mediante EF.

3.3.3 Atributos de los elementos

Como se mencionó en la fase de idealización, elegir un elemento específico o basarse en uno condiciona todo el proceso de modelado, de esta forma, conocer sus atributos como la dimensionalidad, sus nodos, su geometría, grados de libertad, fuerzas, propiedades constitutivas, propiedades de fabricación, etc. Ayudará considerablemente a la resolución del problema numérico.

Otro aspecto que tomar en cuenta del elemento elegido es su estructura física, ya que no es lo mismo idealizar una barra que una placa o membrana.

3.3.4 Ensamblaje

El procedimiento de ensamblaje de un modelo de elementos finitos implica dos pasos básicos:

1. Globalización. Las ecuaciones del elemento son transformadas en un sistema de coordenadas globales.
2. Unión. Las ecuaciones de rigidez del elemento se fusionan para dar lugar a las ecuaciones de rigidez maestra. En aplicaciones prácticas, estas ecuaciones de rigidez maestra suelen implicar miles o incluso millones de grados de libertad por lo que se vuelve necesario la programación.

3.3.5 Condiciones de Contorno

Uno de los puntos fuertes del MEF es su facilidad con la que maneja los límites arbitrarios y las condiciones de interfaz, sin embargo, le es más complicado tratar con condiciones de contorno.

Para entender estas condiciones primero hay que saber distinguirlas, existen 2 tipos de condiciones de contorno: CC Esencial, esta afecta directamente al vector de estado y está impuesto en el lado izquierdo del vector $\{u\}$. CC Natural, esta condición no afecta directamente al vector de estado y está impuesta en el lado derecho del vector $\{f\}$. Si una condición de contorno implica uno o más grados de libertad de forma “directa”, se dice que es esencial, un ejemplo es un desplazamiento prescrito de un nodo, de otra forma se consideraría natural.

El término “directo” pretende excluir derivados de la función primaria, a menos que estos derivados aparezcan como grados de libertad como es el caso de rotaciones en vigas y placas. [20]

3.4 Softwares de Elementos Finitos

Los programas de ordenador que se utilizan para resolución de problemas del MEF se dividen en 2 categorías:

1. **Softwares de programación:** son softwares matemáticos que utilizan un lenguaje de programación (generalmente propio) para la manipulación de matrices, representación de datos y funciones, implementación de algoritmos y muchas otras prestaciones de utilidad en la resolución de problemas de elementos finitos. Entre los más famosos están el software MATLAB y FEAP_{pv}.
2. **Softwares de simulación:** este tipo de programas de simulación aplican directamente el Método de Elementos Finitos para realizar cálculos estructurales estáticos y dinámicos, lineales y no lineales. Entre los más usados están el software ABAQUS, ANSYS y Cero Parametrics.

3.5 Introducción al Software ABAQUS

Como se ha mencionado anteriormente, Abaqus será el software que se utilizará para la realización de este proyecto. La serie de productos de análisis de elementos finitos unificado de Abaqus ofrece soluciones potentes y completas para problemas de ingeniería rutinarios y más sofisticados que abarcan un amplio espectro de aplicaciones industriales. Esta serie de productos se divide en cinco tipos:

- **Abaqus CAE:** con este software se puede crear, editar, monitorear, diagnosticar y visualizar rápida y eficientemente análisis avanzados de componentes mecánicos o conjuntos estructurales. Abaqus CAE admite conceptos interactivos de ingeniería asistida por computadora, como el modelado paramétrico.

- **Abaqus Standard:** emplea una técnica implícita de integración de las ecuaciones diferenciales para la resolución eventos dinámicos estáticos y de baja velocidad donde la alta precisión en las soluciones de esfuerzos es críticamente importante. Los ejemplos incluyen, la presión de sellado en una junta, el balanceo de un neumático en estado estacionario o la propagación de grietas en un fuselaje de avión compuesto. Dentro de una sola simulación, es posible analizar un modelo tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.
- **Abaqus Explicit:** emplea una técnica explícita de integración de las ecuaciones diferenciales por lo que es particularmente adecuado para simular eventos dinámicos transitorios breves, como pruebas de caída de elementos electrónicos, resistencia a choques automovilísticos e impacto balístico. La capacidad de Abaqus Explicit para manejar eficazmente un comportamiento no lineal severo, como el contacto, lo hace muy atractivo para la simulación de muchos eventos cuasi-estáticos, como el laminado de metal caliente y el aplastamiento lento de dispositivos de absorción de energía.

Los resultados en cualquier punto dentro de una ejecución Abaqus Standard pueden usarse como las condiciones iniciales para la continuación en Abaqus Explicit.

- **Abaqus CFD:** proporciona capacidades avanzadas de dinámica de fluidos computacional con amplio soporte para preprocesamiento y post-procesamiento proporcionado en Abaqus CAE. Estas capacidades de simulación de CFD abordan una amplia gama de problemas no lineales de fluidos térmicos y estructurales de fluidos acoplados.
- **Abaqus Multiphysics:** es el conjunto de productos de Abaqus que se usan para resolver problemas de “multifísicas”. Por ejemplo, Abaqus Aqua simula la carga de ondas hidrodinámicas en estructuras flexibles para conductos costeros. Abaqus CFD entraría en esta categoría, así como muchos más productos Abaqus. [21]

4. Descripción del Modelo de EF

En este apartado se indaga en las fases de la creación de un modelo funcional basado en un sistema de airbags para la protección de una Tablet frente al impacto contra el suelo, para ello se usa Abaqus CAE para crear el modelo y Abaqus Explicit para simular el impacto del sistema contra el suelo.

Así mismo, a lo largo del apartado se mencionan varias veces la utilización de módulos de la interfaz de Abaqus para el diseño y simulación del sistema, estos son:

- **Módulo “part”:** donde se define y se crea la geometría de los elementos que componen el sistema. Al no ser un software de diseño como tal, es mejor definir geometrías sencillas para evitar problemas en la simulación que nos den errores en los resultados.
- **Módulo “property”:** en donde se crean los materiales de los elementos, sus propiedades mecánicas y secciones a usar.
- **Módulo “assembly”:** que se utiliza para ensamblar los elementos creados en “part”, duplicarlos, dividirlos, desplazarlos y muchas más prestaciones para poder crear el modelo deseado.
- **Módulo “interaction”:** este módulo se utiliza para crear interacciones entre elementos para que trabajen en conjunto, ya sea interacciones de contacto, choque o cavidad fluida.
- **Módulo “load”:** dentro de sus funciones está la creación de condiciones de restricción de movimientos o bien, la aplicación de cargas en una superficie.
- **Módulo “step”:** que se utiliza para asignar los valores de tiempo de procesado, duración de la simulación y para parámetros predefinidos en el modelo.
- **Módulo “mesh”:** que se utiliza para definir el elemento de mallado y el tamaño de este para poder crear la malla que definirá el modelo.
- **Módulo “job”:** en donde se resuelve el problema planteado en los anteriores módulos.
- **Módulo “visualization”:** una vez ejecutado el “job”, se utiliza este módulo para la visualización de la interacción planteada y el análisis de resultados impuestos.

4.1. Diseño

Al ser este un trabajo de optimización, se realiza la simulación de varios prototipos para el sistema de airbags, sin embargo, los elementos como la Tablet o el “suelo”, así como las fases del diseño de los airbags y sus propiedades mecánicas se mantienen iguales para todos los modelos realizados en este trabajo.

Todos los modelos se componen de tres elementos fundamentales:

1. El sólido que se quiere proteger:

Una Tablet que tendrá las propiedades mecánicas del cristal en todo su cuerpo debido a que es la parte más vulnerable de una Tablet y porque no se quiere entrar al detalle del sólido a proteger por falta de información de su rigidez y complejidad que añadiría al sistema.

2. Los airbags que rodean la Tablet para su protección:

Estos airbags están formados por películas de Polietileno de alta densidad (HDPE), uno de los materiales más usados para este tipo de sistemas.

El polietileno representa un 30% de todo el plástico del mundo, se decidió utilizar el polietileno de alta densidad porque es bastante barato y, a diferencia del polietileno de baja densidad, tiene una mayor resistencia a deformación, mayor endurecimiento por deformación, buena resistencia al impacto y resistencia a la perforación además es fácil de procesar y se puede mezclar con otros polímeros y/o aditivos como tratamientos superficiales. Al igual que el polietileno de baja densidad LDPE, tiene una buena resistencia química, una buena barrera al vapor, pero pobre al gas y propiedades de intemperie. Otras limitaciones o desventajas del HDPE es que, es propenso a agrietarse por tensión, es difícil de unir, es inflamable y es poco resistente a temperaturas elevadas.

Sin embargo, una película de HDPE tiende a ser más rígido que otras películas de polietileno por lo que lo hace muy útil para empaquetamientos que necesitan mantener su forma [22]. Esta rigidez lo hace interesante para este proyecto ya que el airbag se deformaría menos previniendo un contacto directo del suelo con la Tablet.

3. Una superficie homogénea en la que se simula el impacto Tablet-suelo:

Suelo rígido que como con el sólido a proteger, no se quiere llegar al detalle de este por lo que no tiene un material específico.

Cabe destacar que el Software de Abaqus no impone las unidades de medida, por lo que el usuario es el encargado de utilizar medidas para garantizar la consistencia del modelo; dicho esto, el sistema de unidades que se utiliza en la realización del trabajo es el Sistema internacional: metros (m), segundos (s), Julios (J), Pascal (Pa)...

A continuación, se describen los pasos a seguir para el diseño de los elementos principales del modelo utilizando imágenes del primer modelo válido realizado.

4.1.1 Tablet

Mediante el módulo “part” de Abaqus se crea un elemento en 3D de tipo sólido deformable con dimensiones: 0.17m de ancho, 0.0075m de alto y 0.24m de largo, dimensiones propias de una Tablet de 10 pulgadas.

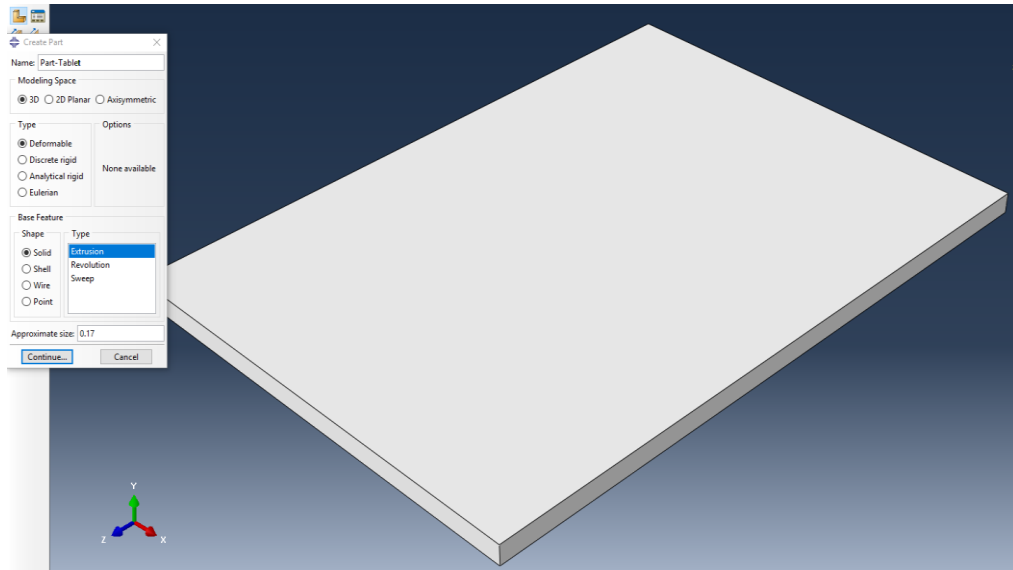


Ilustración 16: Creación de la "part" Tablet.

El siguiente paso es asignarle una sección con un material. Este proceso se realiza mediante el módulo “*property*” de Abaqus, primero se crea el material, que tendrá las propiedades del cristal de la Tablet, con un Módulo de Young $E=70 \times 10^9 \text{ Pa}$, un coeficiente de Poisson $\nu=0.3$ y una densidad de $\rho=1470.58 \text{ Kg/m}^3$, densidad necesaria para que la masa de la Tablet sea de 0.45Kg, peso promedio en una Tablet de esas dimensiones. Una vez creado el material, se crea la sección del elemento Tablet y se le asigna la misma.

A continuación, hay que generar el elemento en el módulo “*assembly*”.

Solo queda mallarlo, este paso se realiza en el módulo “*mesh*”, se selecciona la *part* si se ha generado *dependent* o *assembly* si se ha generado *independent*.

La sensibilidad de malla dependerá del tipo de elemento asignado (*ver apartado 5.7.2*), para este caso se ha elegido elementos lineales de tipo C3D8R.

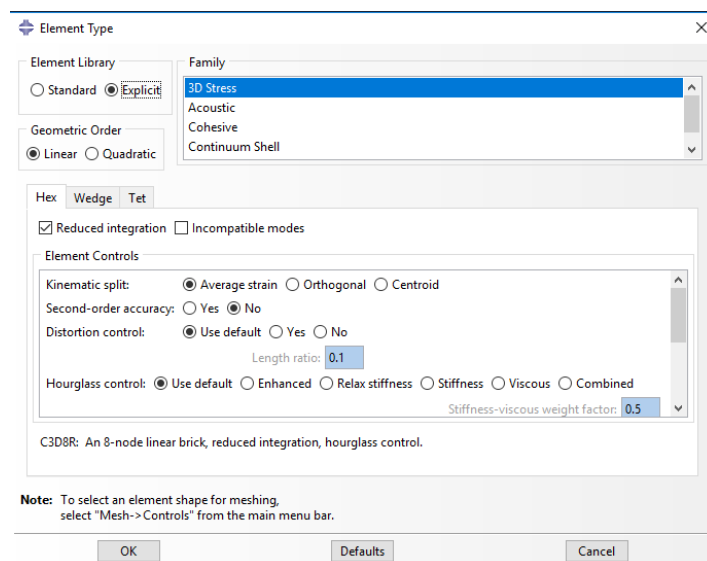


Ilustración 17: Tipo de elemento de mallado de la Tablet.

Asignado el elemento de mallado y pulsando en el comando “*mesh part*”, si se ha realizado los pasos correctamente se puede observar la generación del mallado en la Tablet de color azul claro con los elementos bien definidos.

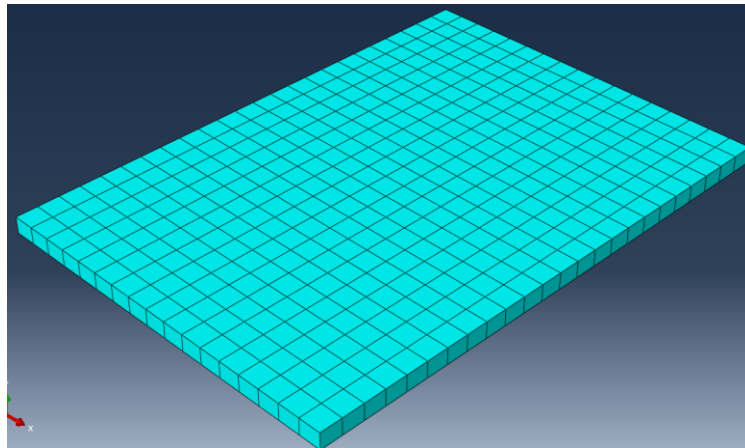


Ilustración 18: Mallado de la Tablet.

Por último, utilizando la herramienta de creación de sets en el mismo módulo, como su nombre indica se crea un set de tipo nodal y se le asigna al nodo que está en el centro de gravedad si existiera, si no, se le asigna al nodo más próximo a este. Este set servirá como punto de análisis de las variables (aceleración, deformación, etc.) para la obtención de resultados. Estas variables se pueden asignar utilizando el comando “*History Output Request*”.

Se ha considerado que 2000 intervalos son suficientes para poder analizar correctamente las variables en el periodo de tiempo asignado.

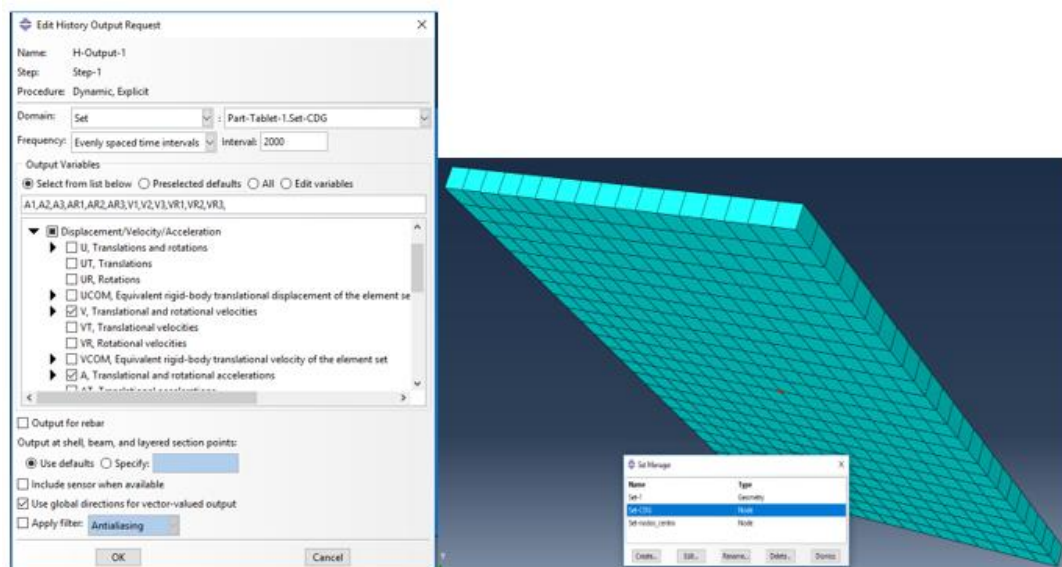


Ilustración 19: Asignación del nodo CDG y las variables a analizar.

TABLET	
Tipo	Sólido homogéneo deformable
Dimensiones	(0.17x0.0075x0.24) m
Material	Cristal
Módulo de Elasticidad (E)	70×10^9 Pa
Coefficiente de Poisson (ν)	0.3
Densidad (ρ)	1470.58 Kg/m^3
Masa	0.45 Kg
Elemento de malla	Tipo C3D8R
Seed	0.01

Tabla 2: Resumen del diseño de la Tablet.

4.1.2 Superficie “suelo”

Utilizando de nuevo el módulo “*part*” se crea una superficie plana y rígida que simulará el suelo con el que la Tablet chocará. En comparación con la Tablet, esta superficie es mucho más grande ya que, si se realiza una simulación de una caída a elevada altura o de mucho tiempo, el sistema de airbags hará que rebote la Tablet sobre la superficie pudiendo producirse varios impactos en diferentes zonas de la superficie.

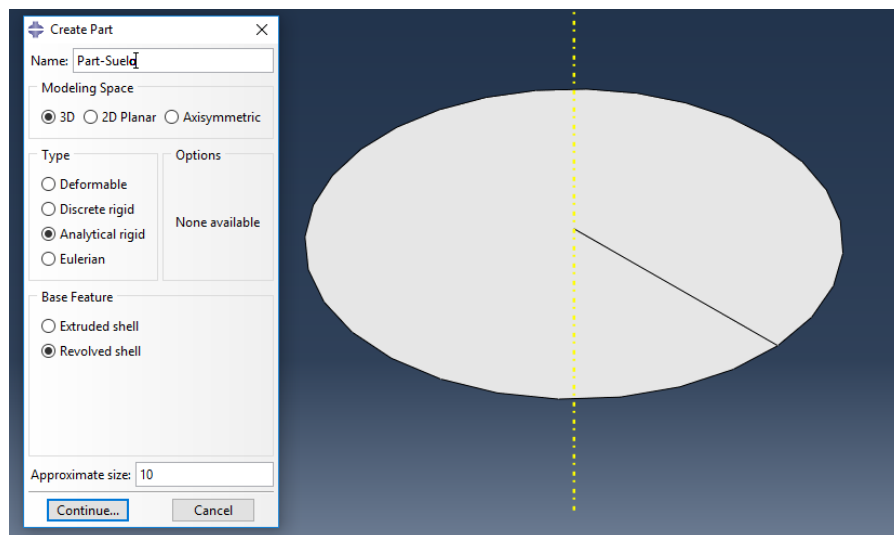


Ilustración 20: Creación de la superficie "suelo".

En este mismo módulo, utilizando el comando “*Tools*” de la barra de herramientas, se crea una superficie para distinguir la parte en la que se producirá el choque, y un “*Reference point*” (punto de referencia), que se utiliza como región para asignar la condición de restricción de desplazamientos y rotaciones de la superficie, no sin antes haber generado el elemento en el módulo “*assembly*” en la posición que se considere adecuada para el impacto del sistema.

La condición de restricción se realiza en el módulo “*load*” de Abaqus en el apartado “*Create Boundary Condition*”.

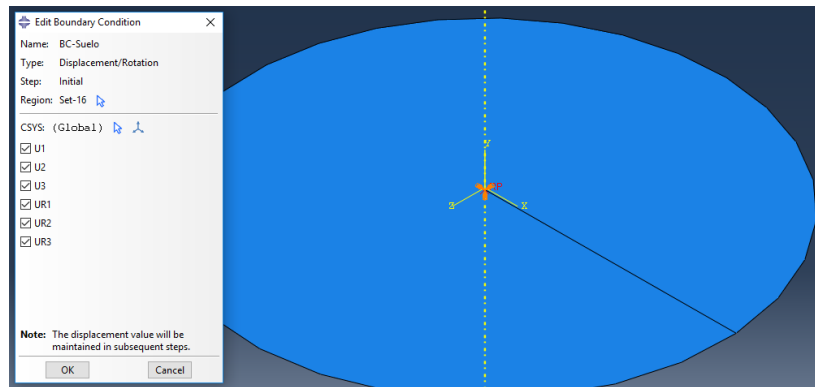


Ilustración 21: Asignación de la condición de restricción de la superficie "suelo".

4.1.3 Airbags

Para la creación de los airbags se necesitan de varios sólidos auxiliares, estos se crean utilizando el módulo “part”. Para este trabajo se ha considerado utilizar dos bases para la formación de airbags, una base es cilíndrica y la otra es esférica.

El primer paso para generar el airbag es la creación de la base del airbag, en este primer modelo se utilizó del tipo con forma de cilindro de 0.03m de diámetro y 0.24m de longitud.

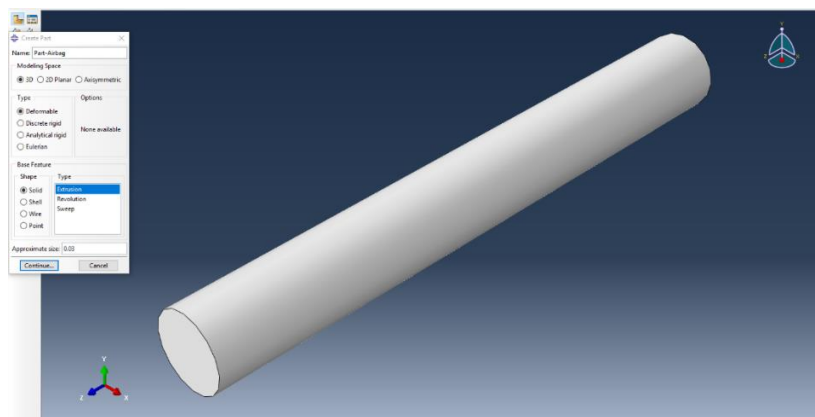


Ilustración 22: Cilindro base.

A continuación, se crea el sólido que servirá para darle la forma buscada para este modelo, previamente calculada analíticamente, con dimensiones iguales o mayores a la longitud del cilindro base.

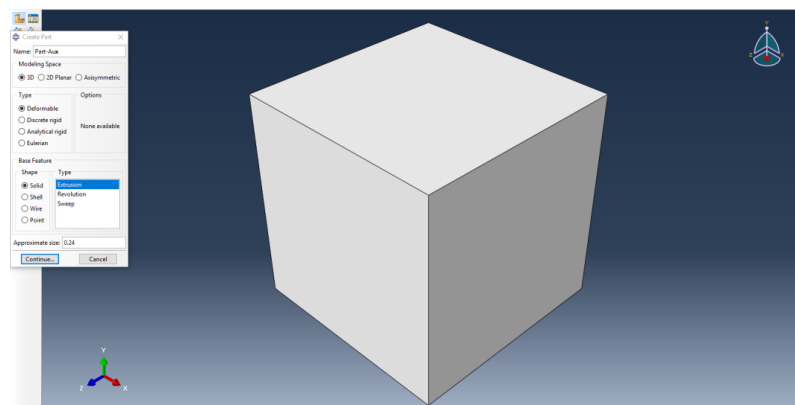


Ilustración 23: Sólido auxiliar.

El módulo de Abaqus que nos permite darle la forma al airbag es el de “assembly”, primero se debe generar los elementos para su posterior desplazamiento utilizando las herramientas que nos ofrece el módulo.

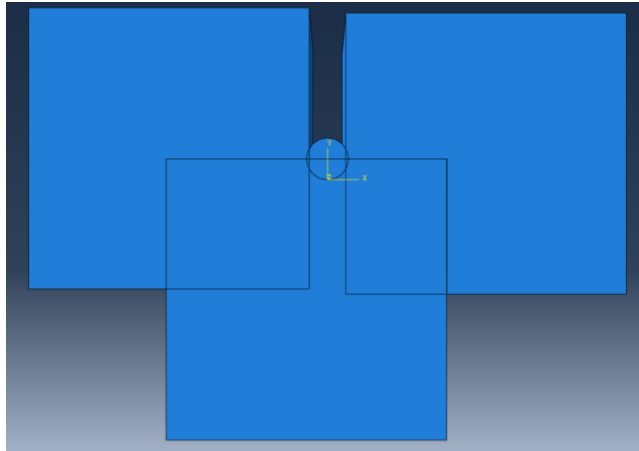


Ilustración 24: Desplazamientos de los sólidos auxiliares.

Una vez que los elementos estén en la posición deseada, se genera el airbag utilizando la herramienta “Merge/Cut Instances”, se asigna la opción “Cut” que corta la geometría y suprime las partes originales dando lugar a un sólido nuevo con la forma buscada. En ocasiones en las que se busque combinar geometría para conseguir la deseada, se utiliza la opción “Merge” en lugar de “Cut”.

Generalmente los airbags tienen diferentes formas si la parte en la que se apoya del elemento a proteger es diferente, por lo que será necesario crear varias formas de airbags, sin embargo, el procedimiento es el mismo.

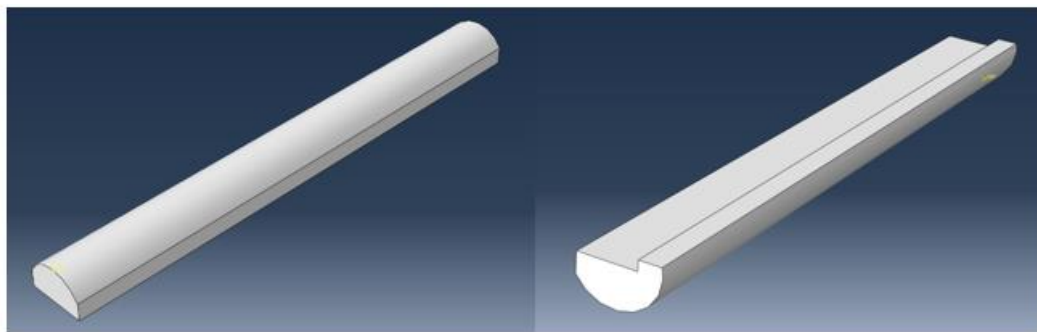


Ilustración 25: Airbag superior y airbag lateral.

El siguiente paso es convertir los airbags de sólidos a tipo “shell”, utilizando el comando “shape-shell from solid” del módulo “part” (ver **Ilustración 29**).

Utilizando el comando “Tools” del módulo “part”, se crea una superficie interior y un punto de referencia en la superficie de los airbags que servirán para la creación del fluido que circulará en el interior de estos (ver **apartado 4.2**).

A su vez, es necesario crear superficies de todas las partes del airbag que hagan contacto con el elemento a proteger o con otro airbag. Esto facilitará el procedimiento de ligar los desplazamientos de los airbags (ver **apartado 4.3**).

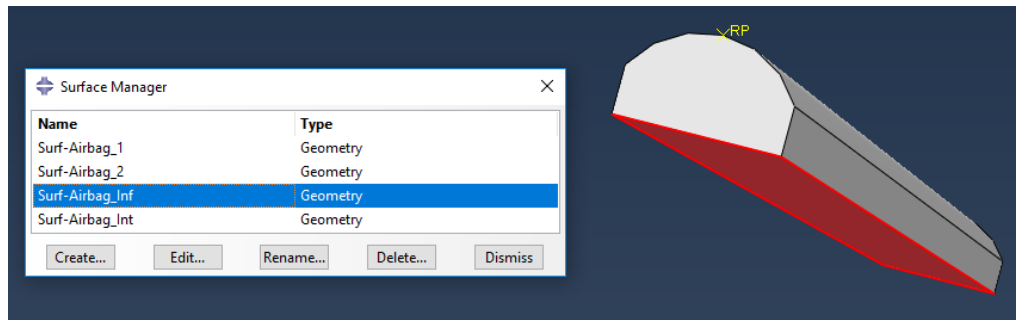


Ilustración 26: Creación de las superficies del airbag.

Posteriormente, al igual que con la Tablet, utilizando el módulo “property”, se le asigna una sección al airbag con un material de tipo membrana.

Para este proyecto se ha decidido utilizar el polietileno de alta densidad de 0.0001m de espesor, con una densidad de 970 Kg/m^3 , un Módulo de Young de 10^9 Pa y un endurecimiento por deformación de $20 \times 10^6 \text{ Pa}$.

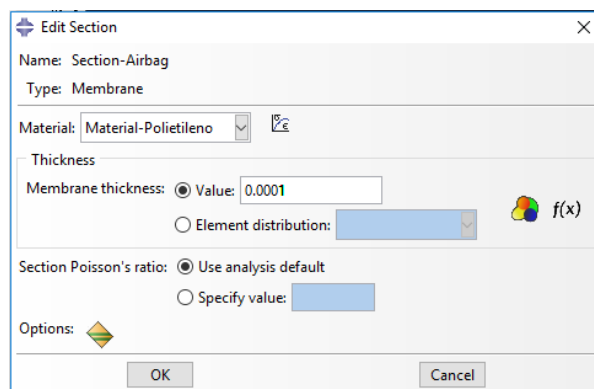


Ilustración 27: Sección del elemento airbag.

El último paso del diseño de los airbags es el de mallarlos. Para ello antes hay que generarlos en el módulo “assembly” (ver Ilustración 29) como dependientes para poder mallarlos en “part” desde el módulo “mesh”. El tipo de elemento para el mallado de todos los airbags de este proyecto es de tipo membrana M3D4R, que la diferencia con un elemento tipo placa es que no soporta flexión, pero si lo estiras soporta mayores cargas a tracción.

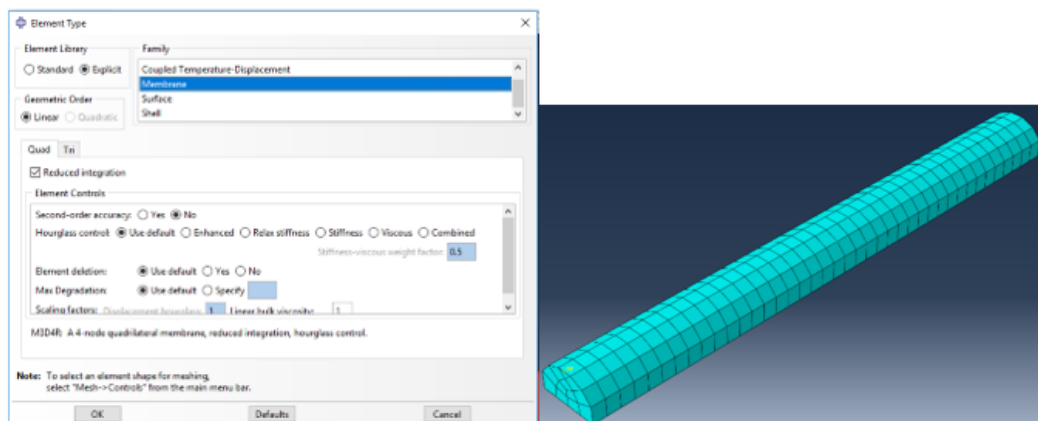


Ilustración 28: Tipo de elemento y mallado de los airbags.

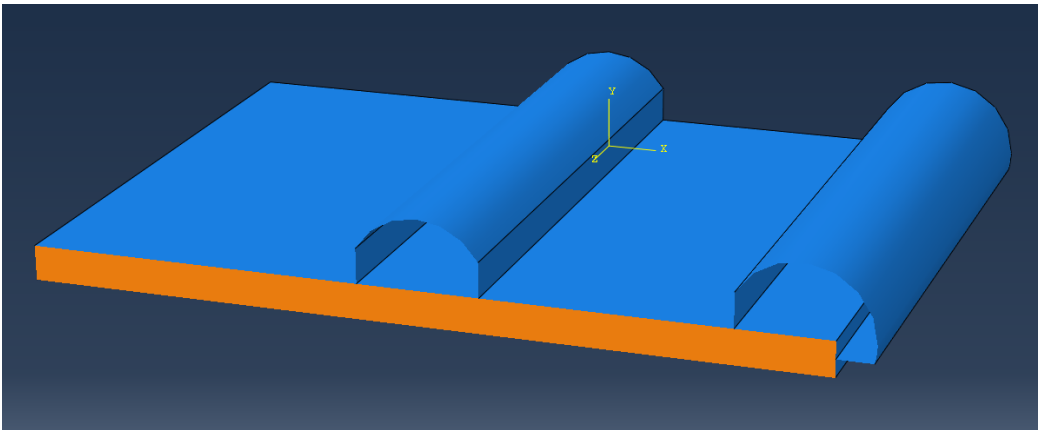


Ilustración 29: Generación de la Tablet y los airbags en "assembly".

AIRBAG	
Tipo	Shell tipo membrana
Material	Polietileno de alta densidad
Espesor	0.0001 m
Módulo de Elasticidad (E)	10 ⁹ Pa
Endurecimiento por deformación	20x10 ⁶ Pa
Coefficiente de Poisson (ν)	0.45
Densidad (ρ)	970 kg/m ³
Elemento de malla	Tipo M3D4R
Seed	0.006

Tabla 3: Resumen del diseño de los airbags.

Finalizado el proceso de diseño de los elementos principales del modelo, se utiliza el módulo “assembly” para duplicar los airbags y desplazarlos hasta conseguir formar el sistema deseado como se puede observar en la Ilustración 30. Para finalizar se crea una superficie exterior que abarque todo el modelo que servirá para establecer el contacto entre el “cuerpo” y el “suelo” (ver apartado 4.3.3).

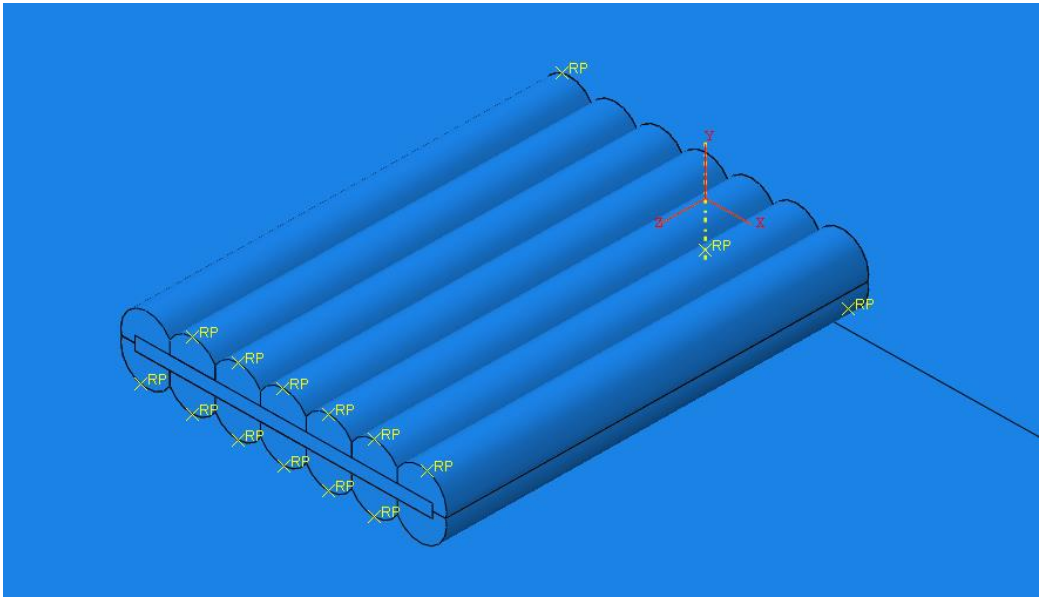


Ilustración 30: Generación del sistema completo.

4.2 Gas interno

Para introducir un fluido, sea líquido o gas (aire en este caso), se utiliza el módulo “interaction” de Abaqus, donde se crea una cavidad fluida en la superficie interior del airbag utilizando como referencia el punto creado con anterioridad, este proceso se repite con cada airbag generado en el conjunto (*ver Ilustración 32*).

El primer paso es crear la propiedad de la interacción del fluido, este gas tendrá las propiedades del aire a temperatura ambiente y presión constante, con un peso molecular de 0.02896 Kg/mol, un calor específico de 28.96 J/ (mol K) y una presión ambiente inicial de 0 Pa. La presión interna del airbag será de 10000 Pa para todos los modelos, esta variable se asigna utilizando el comando “Predefined Field” del módulo “step” y se repite para cada uno de los airbags generados.

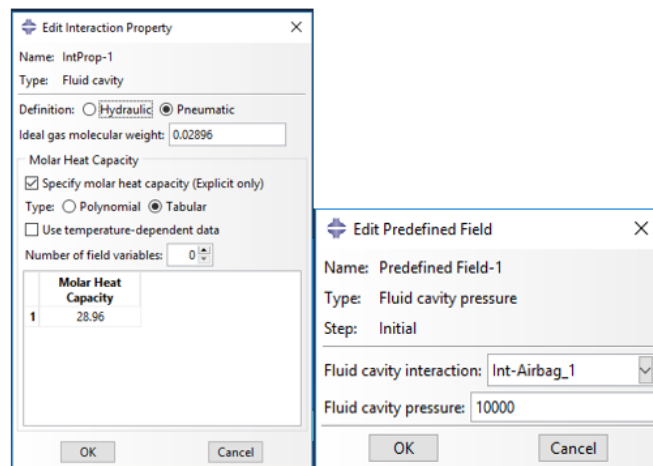


Ilustración 31: Propiedades y presión del gas interno.

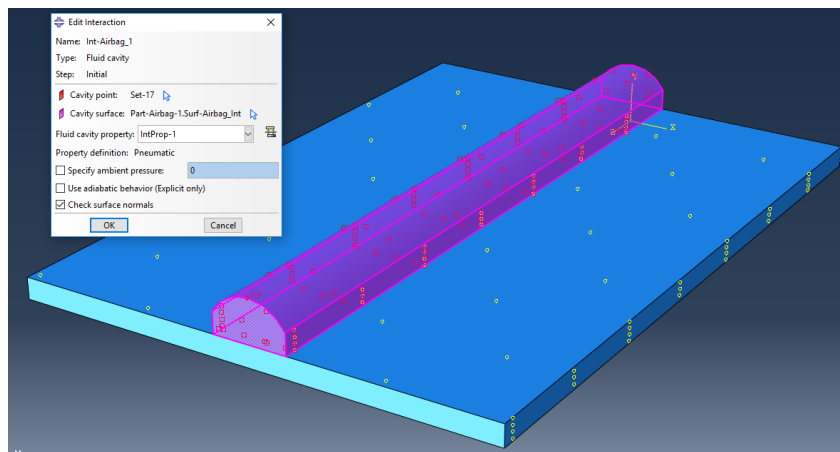


Ilustración 32: Interacción de tipo cavidad fluida.

4.3 Contactos

En este tipo de simulaciones es importante tener en cuenta el contacto que existe, no solo entre el modelo y la superficie “suelo”, sino también donde haya contacto de cualquier partícula polimérica con otra, si se da el caso hay que ligar sus desplazamientos, ya sea en contactos entre los airbags y la Tablet, así como el contacto entre airbags. Para establecer estos contactos se utilizará el módulo “interaction”.

4.3.1 Contacto airbag-Tablet

Primero se ligan los desplazamientos entre airbags y Tablet en las zonas de contacto entre ellos, para ello se utiliza la coacción de tipo “tie” entre dos superficies, una maestra que será la de mayor rigidez (la Tablet en este caso), y otra esclava de menor rigidez (el airbag). Este tipo de coacción elimina los nodos de la superficie esclava durante la simulación para evitar que entren en conflicto con los de la maestra y así optimizar la precisión de los esfuerzos representados. [23]

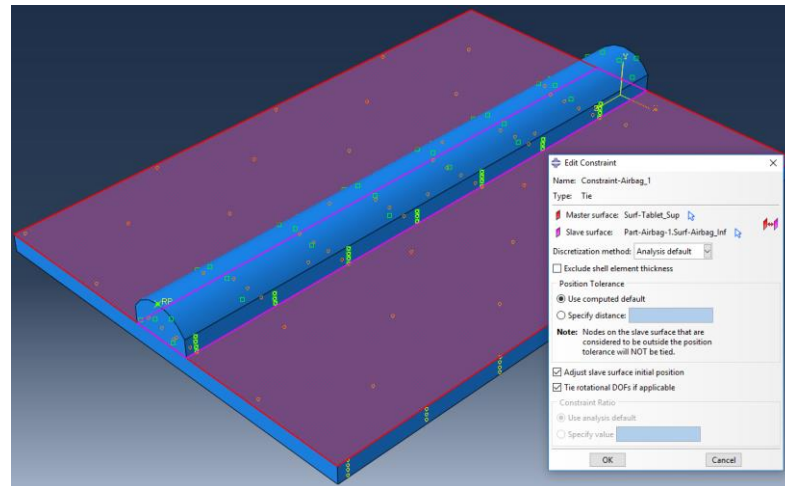


Ilustración 33: Coacción airbag-Tablet.

4.3.2 Contacto airbag-airbag

El proceso para ligar los desplazamientos en las zonas de contacto entre airbags es el mismo que para airbag y Tablet. Al tener los airbags la misma rigidez es indiferente cual sea la superficie esclava y cual la maestra. Cabe destacar que solo se ligan los desplazamientos en airbags si estos se invaden el espacio físicamente.

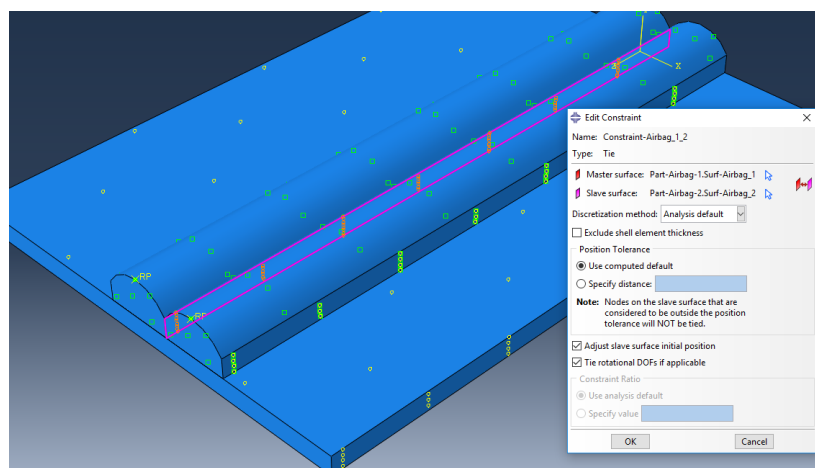


Ilustración 34: Coacción airbag-airbag.

4.3.3 Contacto “cuerpo”- “suelo”

Para establecer el contacto entre el modelo y la superficie “suelo”, primero se crea la propiedad interactiva de tipo “Contact”, se le asigna un comportamiento normal de tipo “hard contact” y un comportamiento tangencial de tipo “penalty” con un coeficiente de fricción de 0.2 para que haya disipación de energía.

A continuación, se crea la interacción de contacto explícito, se selecciona el par de superficies que van a realizar el contacto y la propiedad interactiva creada anteriormente.

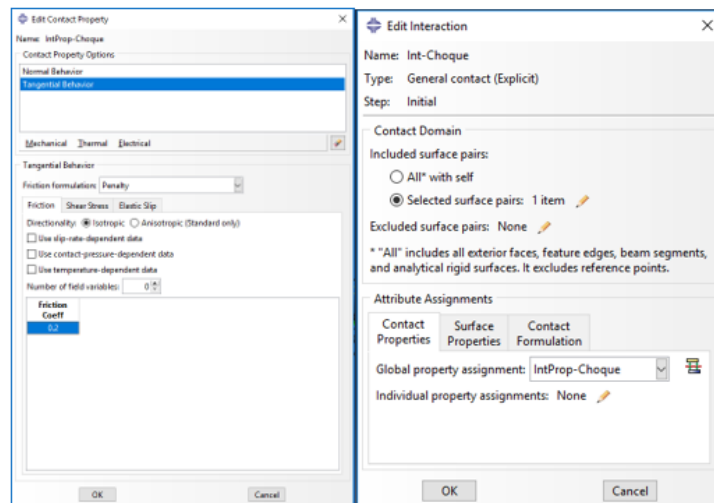


Ilustración 35: Propiedades e interacción del contacto cuerpo-suelo.

4.4 Consideraciones importantes

Estas son algunas de las consideraciones y variables importantes que se tienen en cuenta en la simulación en Abaqus:

- La temperatura de cero absoluto se establece como -273.16 K.
- La constante universal de los gases se establece como 8.1344 J/ (mol K).
- En todos los modelos se establecerá una velocidad inicial de 2 m/s en dirección Y que se mantendrá constante hasta que el modelo entre en contacto con el “suelo”.

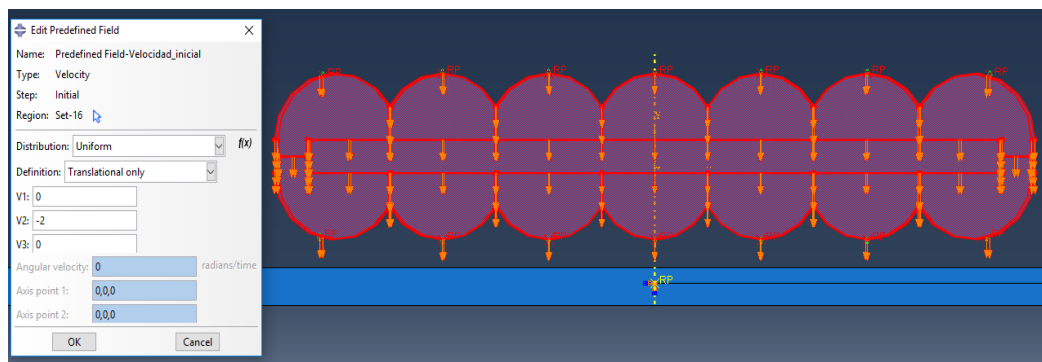


Ilustración 36: Velocidad inicial del cuerpo.

- Solo se simulan impactos de la cara frontal de la Tablet ya que se busca la situación más desfavorable, siendo este un choque entre la pantalla de la Tablet y el suelo. Para demostrar esta teoría se realiza un análisis de un impacto lateral del modelo final obtenido (*ver apartado 5.7.4*).

- La distancia entre la superficie del airbag y el “suelo” en paralelo es de 0.01m para todos los modelos realizados. Se ha tomado esta medida debido a que este tipo de sistemas suelen ir empaquetados en cajas donde la distancia entre el airbag y la superficie de la caja suele rondar estas distancias. A pesar de esto, la altura de caída no debería ser una variable importante debido a que la velocidad inicial es constante, esta teoría se demuestra en el apartado 5.7.3.
- El tiempo de simulación se establecerá en 0.02 segundos debido a que el primer rebote que realiza el cuerpo inicia a los 0.005 segundos. Tiempo suficiente para poder analizar el impacto y no establecer tiempos de computación muy elevados.

5. Análisis de Resultados

Como se ha mencionado anteriormente se trata de un trabajo iterativo con el objetivo de obtener resultados aceptables de una variable global. Se ha decidido hacer el análisis de la aceleración en un punto característico del elemento a proteger (Centro de Gravedad). Se toma la aceleración porque es una variable global y un indicio de la magnitud de las tensiones, motivo por el cual se busca reducir el pico de aceleración en el momento del impacto.

Además de la aceleración se ha considerado, con menor importancia, la variación de algunas de las energías características del modelo entero como la Energía Interna o la Energía por Fricción.

Para conseguir los resultados deseados, se ha realizado una serie de diseños para el sistema de airbags, variando sobre todo la geometría de estos en cuanto a la forma y dimensiones, siendo siempre las características de la Tabla 3 iguales para todos los modelos creados.

Una vez realizado el modelo al que consideraremos “final”, se procede a modificar variables como la presión interna de los airbags, el tamaño del elemento de mallado de los airbags y la altura entre el “cuerpo” y el “suelo”, siempre con la intención de observar como varía la aceleración de la Tablet respecto a estas variables.

5.1 Primer modelo

Como primer modelo, mostrado ya para la explicación del apartado 4, se ha recurrido al diseño de airbags semicilíndricos de 0,03m de diámetro y 0,24m de longitud con una invasión entre airbags de 0,004m, envolviendo al objeto (Tablet) cubriendo toda su superficie frontal, trasera y lateral.

Para generar los resultados pedidos en el “Field Output Request” y “History Output Request”, se utiliza el módulo “job”. Si se ha seguido correctamente todos los pasos indicados en el apartado 4 no tiene porqué dar error al generar la simulación.

Los resultados se observan en el apartado de visualización donde, para el primer modelo se han obtenido los siguientes resultados:

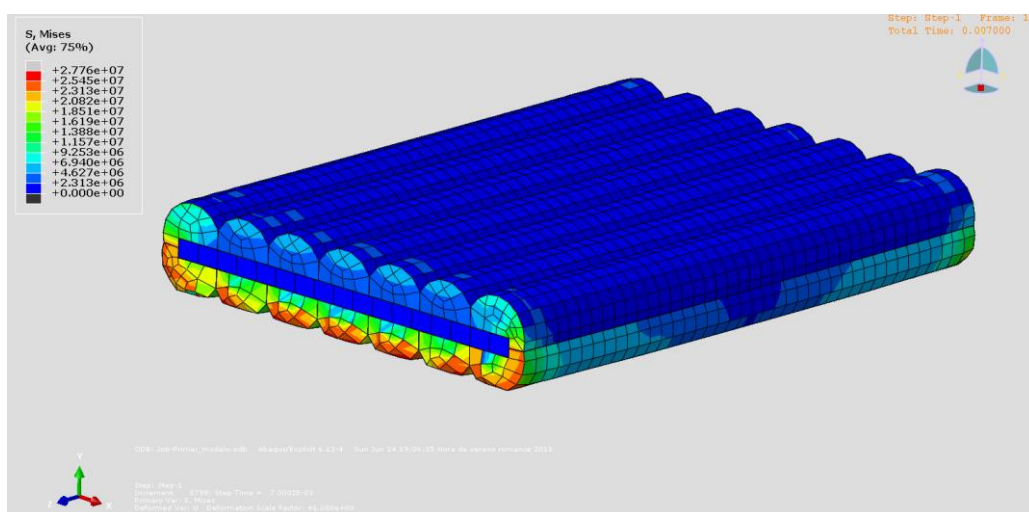


Ilustración 37: Momento crítico del impacto del primer modelo.

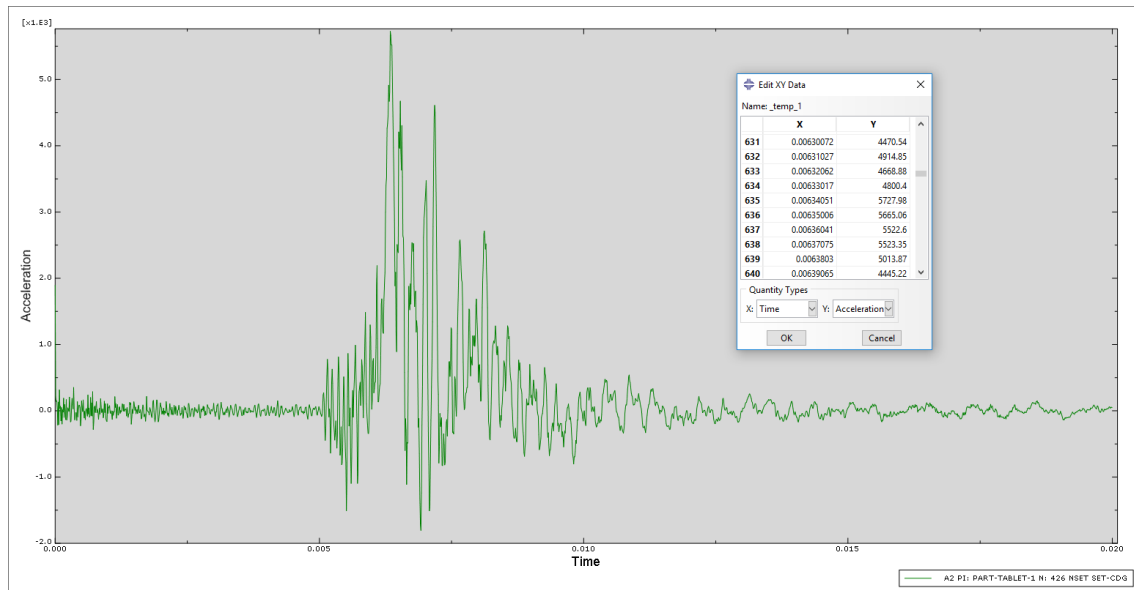


Ilustración 38: Variación de la aceleración en el tiempo del primer modelo.

El pico de aceleración obtenido es de 5727.98 m/s^2 , aceleración demasiado grande que indica que el modelo soporta mucha tensión en su propósito de proteger y existe la posibilidad de que el sistema falle y la Tablet sufra un impacto directo. Este resultado puede ser debido a que los airbags no son lo suficientemente grandes, que el número de airbags no sea el óptimo o que la presión interna en estos sea muy elevada o muy baja.

Sin embargo, para intentar reducir esta aceleración se ha decidido modificar solo la geometría de los airbags, si bien variando la presión interna se podría alcanzar resultados correctos, la propuesta como se ha mencionado antes es conseguir un modelo final y posteriormente modificar otras variables como la presión interna de este.

PRIMER MODELO

N.º de Airbags	14
N.º de Elementos	7414
Aceleración máxima	5727.98 m/s^2
Tensión Von Mises máxima	$2.776 \times 10^7 \text{ Pa}$
Energía de Fricción (ALLFD)	0.278 J
Energía Interna (ALLIE)	1.086 J
Energía Total (ETOTAL)	0.95 J

Tabla 4: Resultados del primer modelo.

Uno de los indicios para saber si la simulación es correcta es que la energía total se mantiene constante, normalmente todo el Trabajo Externo debería ser cancelado por la Energía Interna y la Energía cinética. [24]

Se puede observar de los resultados que la Energía de Fricción es casi un tercio de la Energía Total por lo que uno de los objetivos de los siguientes modelos es intentar reducir esto, así como la Energía Interna máxima, energía que es superior a la total, indicio de malos resultados en la protección. En mecánica, el trabajo que se realiza sobre un sistema se manifiesta como un aumento de su Energía Cinética y como se sabe de la primera ley de la Termodinámica, la Energía Interna es la suma de la Energía Cinética y la Potencial. [25]

5.2 Segundo modelo

En el segundo modelo se ha decidido utilizar airbags cilíndricos de 0.03m de diámetro y 0.24m de longitud sin invasión de superficie entre airbags, al igual que con el modelo anterior cubriendo toda la superficie frontal y trasera de la Tablet.

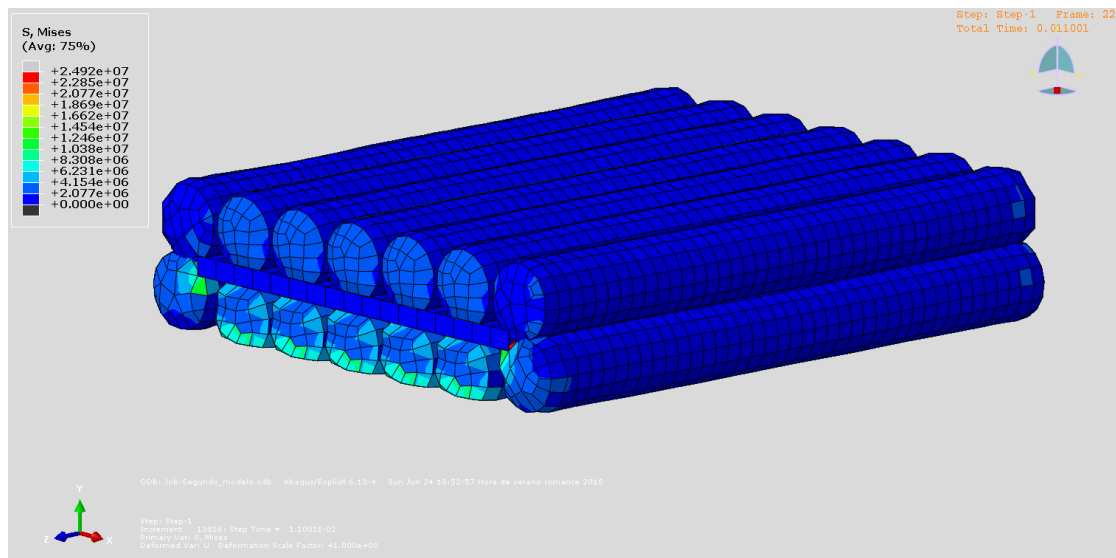


Ilustración 39: Momento crítico del impacto del segundo modelo.

Los resultados obtenidos para este modelo son los siguientes:

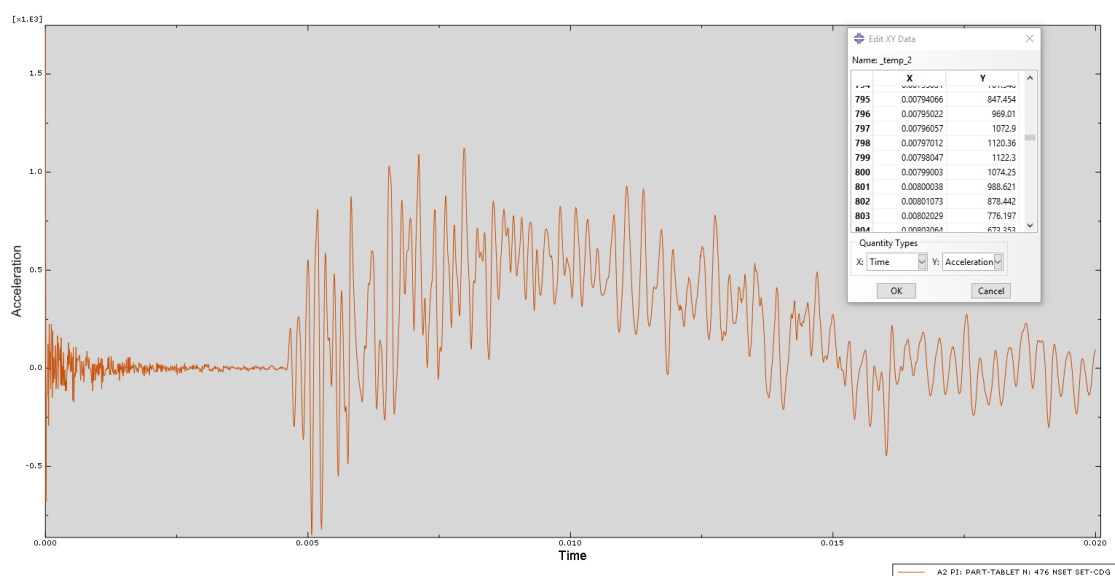


Ilustración 40: Variación de la aceleración en el tiempo del segundo modelo.

SEGUNDO MODELO

N.º de Airbags	14
N.º de Elementos	9786
Aceleración máxima	1122.3 m/s ²
Tensión Von Mises máxima	2.492x10 ⁷ Pa
Energía de Fricción (ALLFD)	0.148 J
Energía Interna (ALLIE)	0.587 J
Energía Total (ETOTAL)	0.964 J

Tabla 5: Resultados del segundo modelo.

En comparación con el primer modelo se ha podido reducir el pico de aceleración considerablemente, si nos fijamos en la Ilustración 40 se puede observar que, tras el impacto la aceleración fluctúa sin dar grandes saltos; sin embargo, no llega a estabilizarse como pasaba con el primer modelo. Esto puede ser debido a que los airbags laterales no están situados de una forma óptima y al chocar con el suelo tambalean considerablemente provocando la oscilación de la aceleración del sistema.

Si se observa la Ilustración 40, al principio de la simulación la aceleración oscila de forma considerable, esto se debe a que los airbags se inflan de golpe y se crean tensiones para que esté en equilibrio, esto se repetirá en todos los modelos.

En cuanto a las energías, respecto al primer modelo se ha conseguido reducir la Energía por Fricción y la Energía Interna a casi la mitad de los primeros valores obtenidos, valores reflejados por la reducción de aceleración. Sin embargo, la Energía de Tensión Recuperable ha aumentado, al solo tener dos modelos como referencia no se puede comentar en profundidad los resultados de esta energía.

Se ha conseguido reducir el pico de aceleración sin embargo sigue siendo elevado para las características del sistema propuesto, pese a esto el modelo que se considerará final no distará demasiado a lo que este representa.

Otro aspecto que tomar en cuenta es que, en los siguientes modelos se eliminarán los airbags laterales, que a pesar de que su función es proteger el canto de la Tablet y repartir mejor las tensiones, al ser el lateral de la Tablet tan pequeño resulta difícil introducir un airbag con una geometría equiparable a los usados en la parte frontal y trasera. Habría que reducir su tamaño considerablemente y esto lo haría inservible porque, como se observó en el primer modelo, airbags de tamaño reducido son incapaces de proteger la Tablet.

5.3 Tercer modelo

Como tercer modelo, el tipo de airbags que se ha decidido utilizar es de tipo cilíndrico de 0.04m de diámetro con una pequeña invasión entre superficies de airbags de 0.002m de diámetro. El objetivo de este modelo es comprobar si, la invasión entre airbags influye en el comportamiento de estos frente al choque, comparándolo con el segundo modelo debido a su similitud en el diseño.

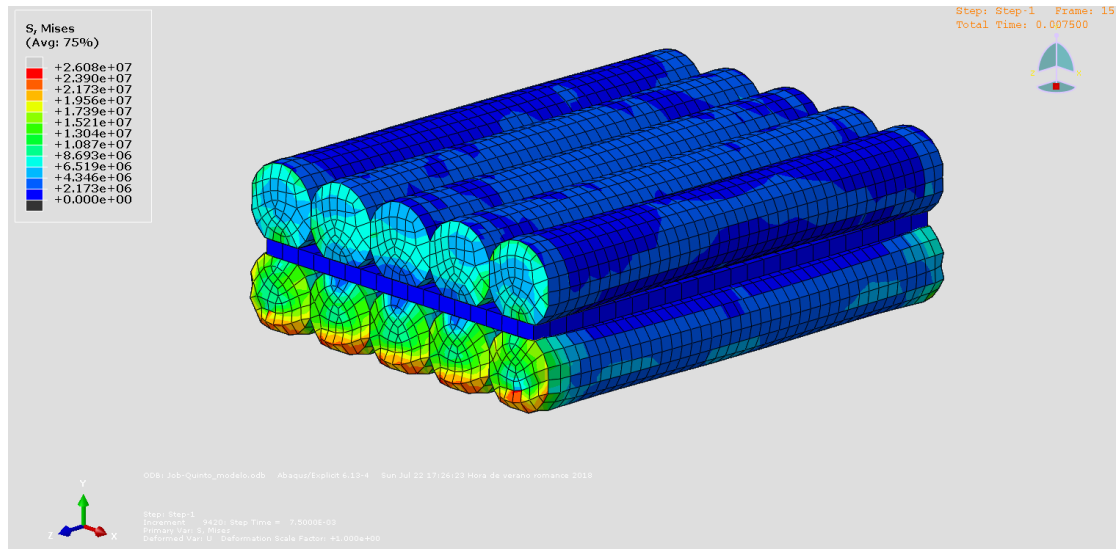


Ilustración 41: Momento crítico del impacto del tercer modelo.

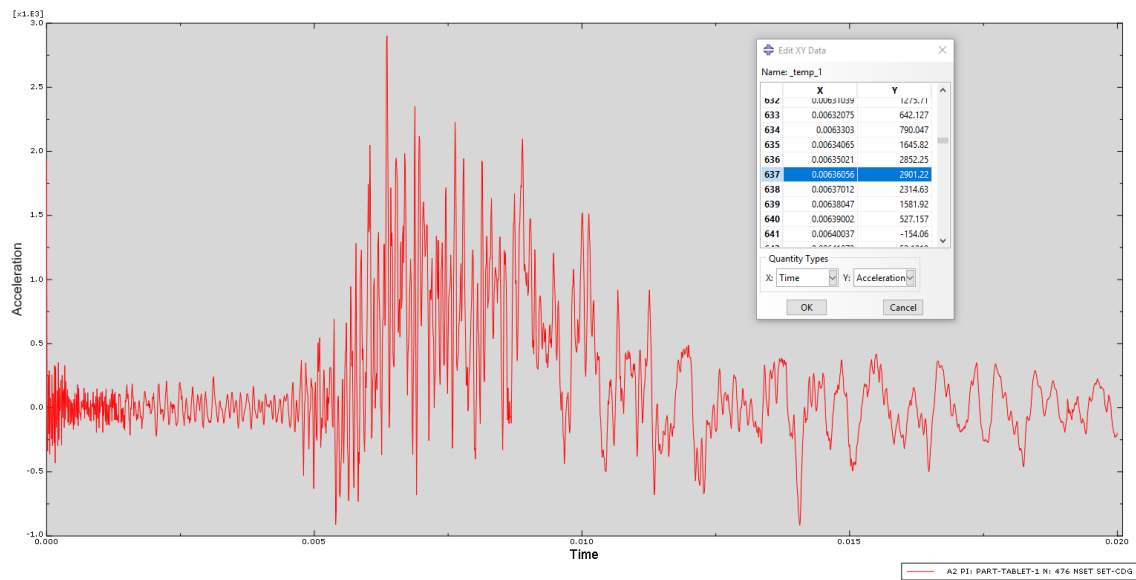


Ilustración 42: Variación de la aceleración en el tiempo del tercer modelo.

TERCER MODELO

N.º de Airbags	10
N.º de Elementos	9348
Aceleración máxima	2901.22 m/s ²
Tensión Von Mises máxima	2.608x10 ⁷ Pa
Energía de Fricción (ALLFD)	0.053 J
Energía Interna (ALLIE)	0.835 J
Energía Total (ETOTAL)	0.962 J

Tabla 6: Resultados del tercer modelo.

Comparándolo con el segundo, los resultados obtenidos son bastante peores. Esto es debido a un motivo, el número de airbags. Al ser la diferencia de tamaño entre ambos diseños de airbags de solo 0.01m, el tener 2 airbags más por cara en el segundo modelo, el área de impacto es mucho mayor y por ende las tensiones que soporta cada airbag se reduce, dando mejores resultados.

Con la realización de este modelo se han podido obtener dos detalles para tener en cuenta en futuros modelos, uno es que es mejor tener más airbags que aumentar solo el tamaño de estos, y la otra es que, diseñar una invasión entre superficies de airbags no implica mejores resultados e implica mayor tiempo de diseño, pero puede ser de utilidad para optimizar el espacio entre airbags y poder aumentar el número de estos.

5.4 Cuarto modelo

Para este cuarto modelo se utiliza airbags esféricos de 0.06m de diámetro sin invasión de superficie entre airbags, cubriendo toda la superficie frontal y trasera de la Tablet. Este modelo se planteó para observar el comportamiento de este tipo de airbags frente al impacto.

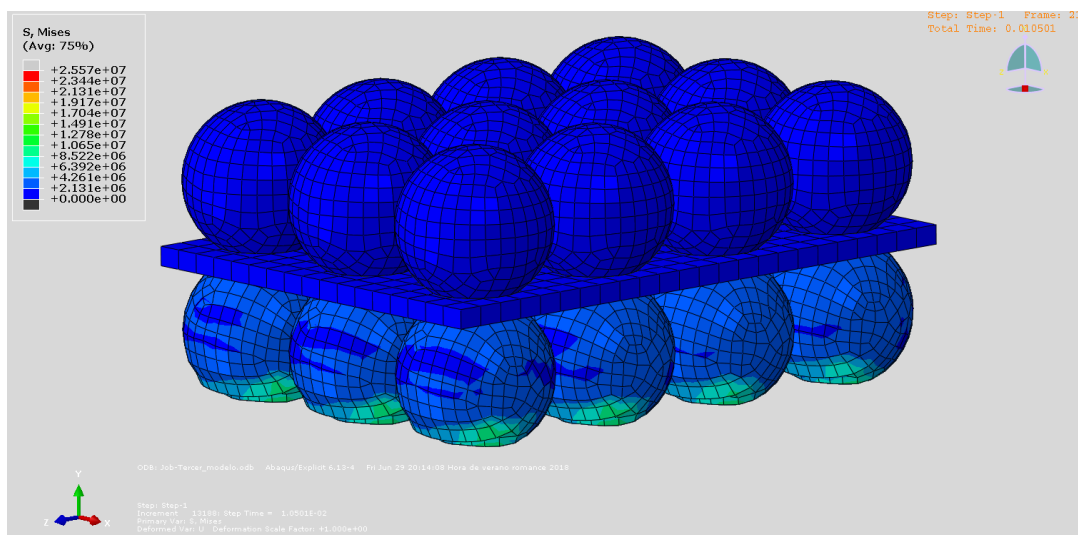


Ilustración 43: Momento crítico del impacto del cuarto modelo.

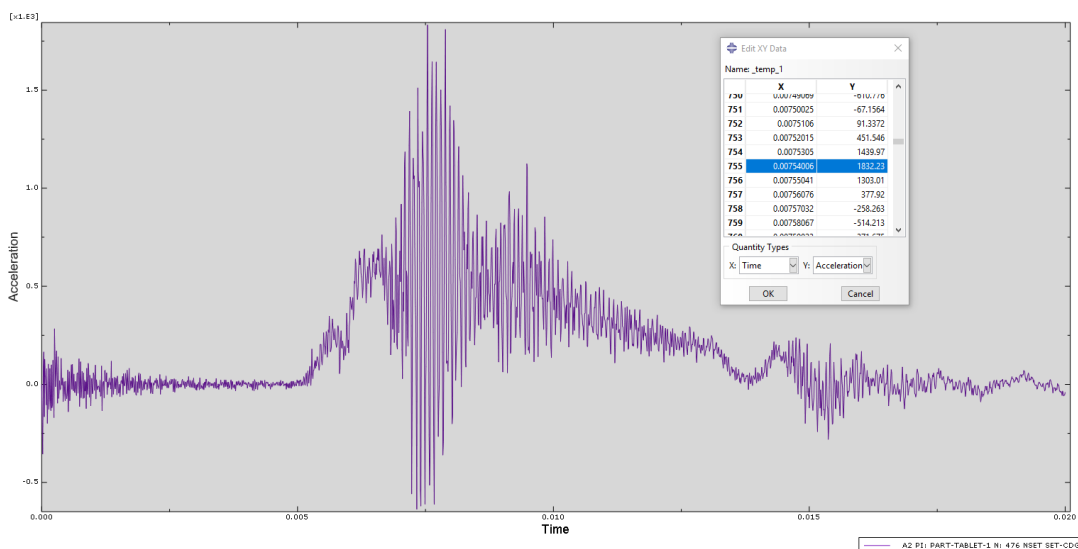


Ilustración 44: Variación de la aceleración en el tiempo del cuarto modelo.

CUARTO MODELO

N.º de Airbags	24
N.º de Elementos	10752
Aceleración máxima	1832.32 m/s ²
Tensión Von Mises máxima	2.557x10 ⁷ Pa
Energía de Fricción (ALLFD)	0.0728 J
Energía Interna (ALLIE)	0.84 J
Energía Total (ETOTAL)	0.952 J

Tabla 7: Resultados del cuarto modelo.

Como se puede observar, el pico de aceleración ha aumentado respecto al segundo modelo, sin embargo, posterior al rebote el sistema consigue estabilizarse y reducir la aceleración a cero.

En cuanto a las energías, se ha conseguido reducir la Energía de Fricción, dato del cual los resultados obtenidos podrían llegar a ser correctos, sin embargo, debido al aumento de la Energía Interna y la reducida Energía de Tensión Recuperable obtenida, estos resultados están lejos de ser los deseados. Pese a sus resultados, con unas pequeñas modificaciones este sistema puede llegar a dar resultados favorables y consistentes.

5.5 Quinto modelo

Como quinto modelo se ha decidido utilizar airbags esféricos de 0.03m de diámetro, cubriendo toda la superficie frontal y trasera de la Tablet. Este sistema fue pensado para analizar la variación de resultados con el modelo anterior, siendo los airbags la mitad de pequeños, sin embargo, en cantidad es 4 veces más numeroso que el cuarto modelo.

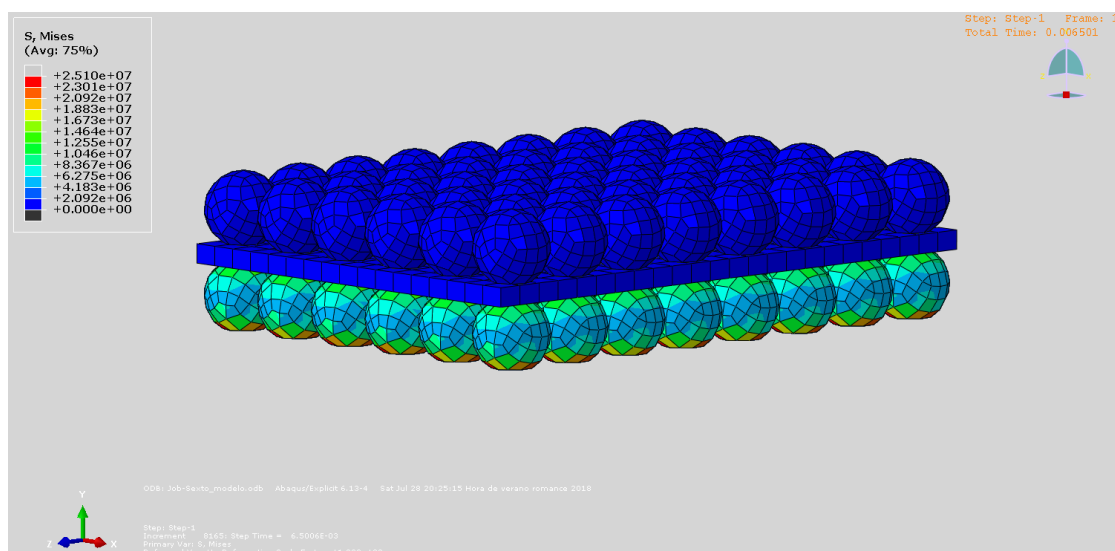


Ilustración 45: Momento crítico del impacto del quinto modelo.

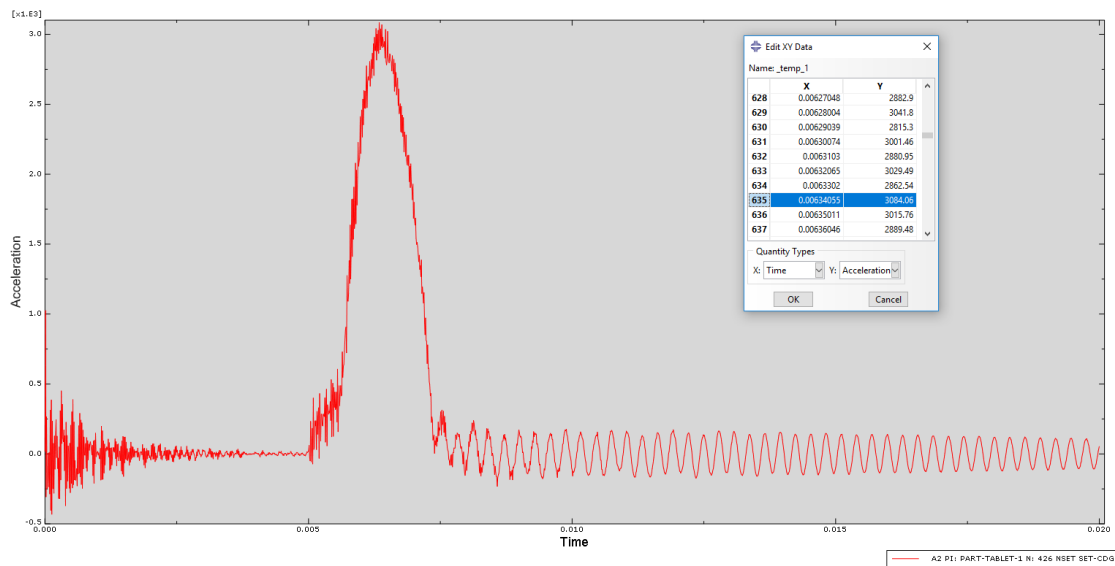


Ilustración 46: Variación de la aceleración en el tiempo del quinto modelo.

QUINTO MODELO

N.º de Airbags	96
N.º de Elementos	10104
Aceleración máxima	3084.06 m/s ²
Tensión Von Mises máxima	2.510x10 ⁷ Pa
Energía de Fricción (ALLFD)	0.0104 J
Energía Interna (ALLIE)	0.932 J
Energía Total (ETOTAL)	0.95 J

Tabla 8: Resultados del quinto modelo.

Como se puede observar, la aceleración máxima y la Energía Interna han aumentado respecto al anterior modelo, sin embargo, el modelo es mucho más estable, posiblemente debido a la poca Energía de Fricción que se crea en el impacto.

Se puede concluir que, en el caso de airbags esféricos importa más la dimensión que la cantidad de estos. Otro dato para tomar en cuenta es que los airbags esféricos han demostrado tener mucha más estabilidad que los cilíndricos.

5.6 Sexto modelo (final)

En este modelo se utiliza airbags cilíndricos de 0.034m de diámetro y 0.24m de longitud con soportes esféricos de 0.04m de diámetro con invasión de superficie de 0.004m, estos soportes no funcionan como airbags separados, sino que el cilindro y las esferas forman un solo airbag y se replican cubriendo toda la superficie frontal y trasera de la Tablet.

Este sistema fue pensado como combinación de los modelos anteriores, en el que los soportes esféricos son los que más sufren el impacto al ser más altos y, como se pudo observar en anteriores modelos, son más estables que los cilíndricos. Un detalle para tener en cuenta es que, se los ha

diseñado con una pequeña invasión de superficie para optimizar el espacio entre estos dejando menos cavidades entre airbags.

En cuanto a la parte cilíndrica es la encargada de distribuir las tensiones con mayor eficiencia y a su vez como refuerzo por si la parte esférica se deforma tanto como para llegar a la parte cilíndrica.

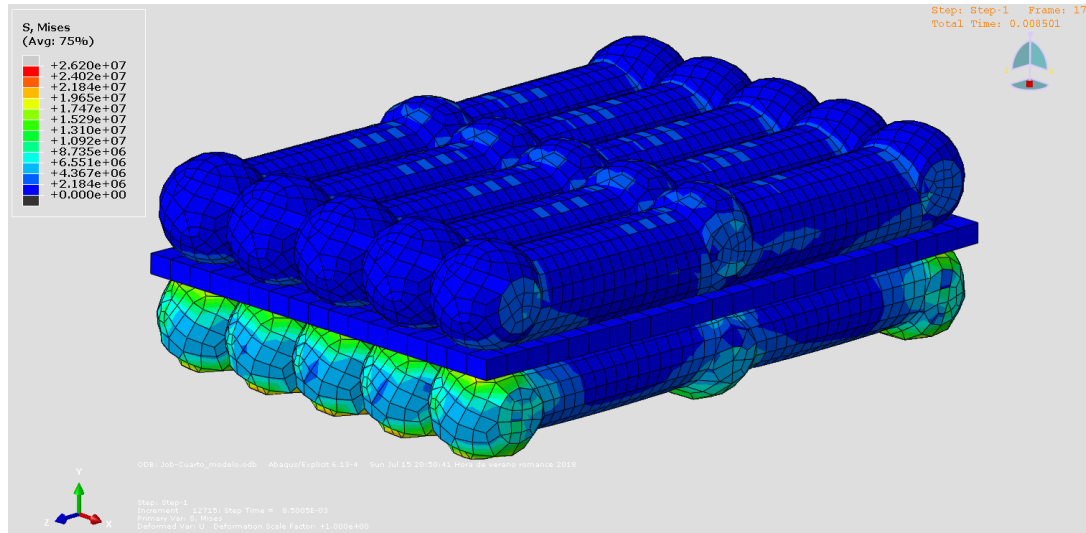


Ilustración 47: Momento crítico del impacto del sexto modelo.

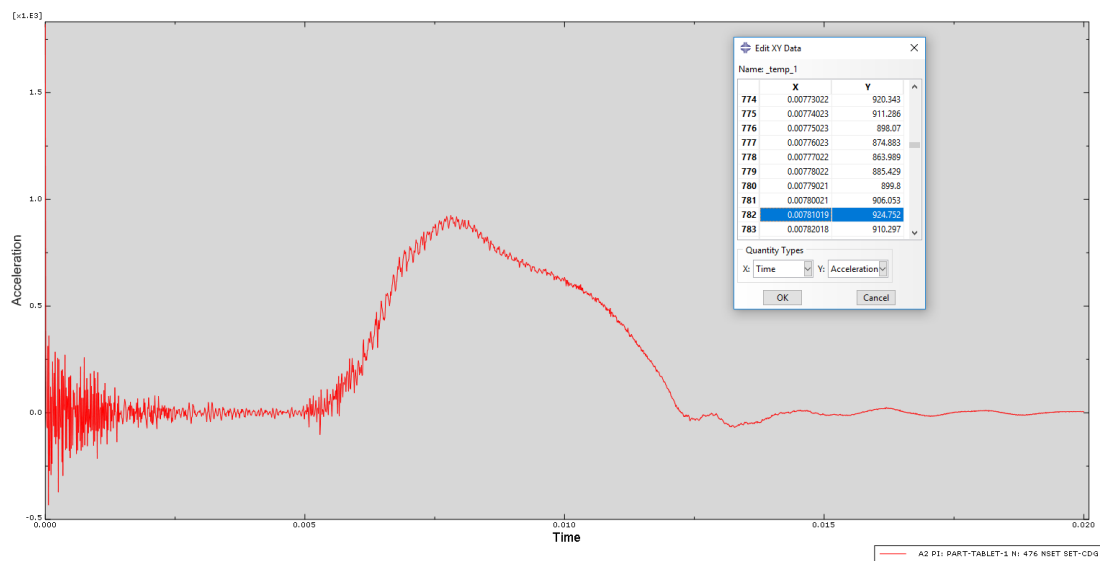


Ilustración 48: Variación de la aceleración en el tiempo del sexto modelo.

SEXTO MODELO

N.º de Airbags	10
N.º de Elementos	10528
Aceleración máxima	924.75 m/s ²
Tensión Von Mises máxima	2.620x10 ⁷ Pa
Energía de Fricción (ALLFD)	0.0466 J
Energía Interna (ALLIE)	0.911 J
Energía Total (ETOTAL)	0.953 J

Tabla 9: Resultados del sexto modelo.

Como se puede observar, es la primera vez que se consigue que el pico de aceleración baje de los 1000 m/s^2 con una Energía de Fricción reducida y una Energía Interna aceptable, considerando lo obtenido en anteriores modelos. Por esta razón este modelo se considerará como el modelo final del trabajo, con el cual realizaremos una optimización avanzada que no incluya sólo la variación de la geometría.

5.7 Optimización del modelo final.

5.7.1 Variación de la presión interna.

Según la empresa china PACK BEST que se dedica a la fabricación de este tipo de productos, la presión interna adecuada para inflar los airbags es de 60000 Pa aproximadamente, y la presión máxima que estos soportan es de 80000 Pa . [26]

A partir de esta información, el análisis de resultados se realiza con presiones internas de: 5000 , 20000 , 40000 , 60000 y 80000 Pa .

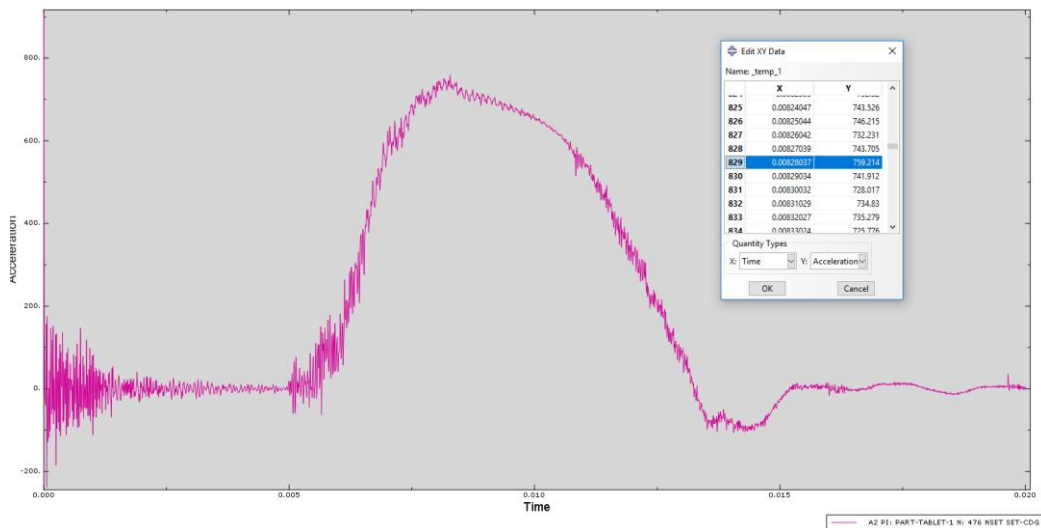


Ilustración 49: Variación de la aceleración con una presión interna de 5000 Pa .

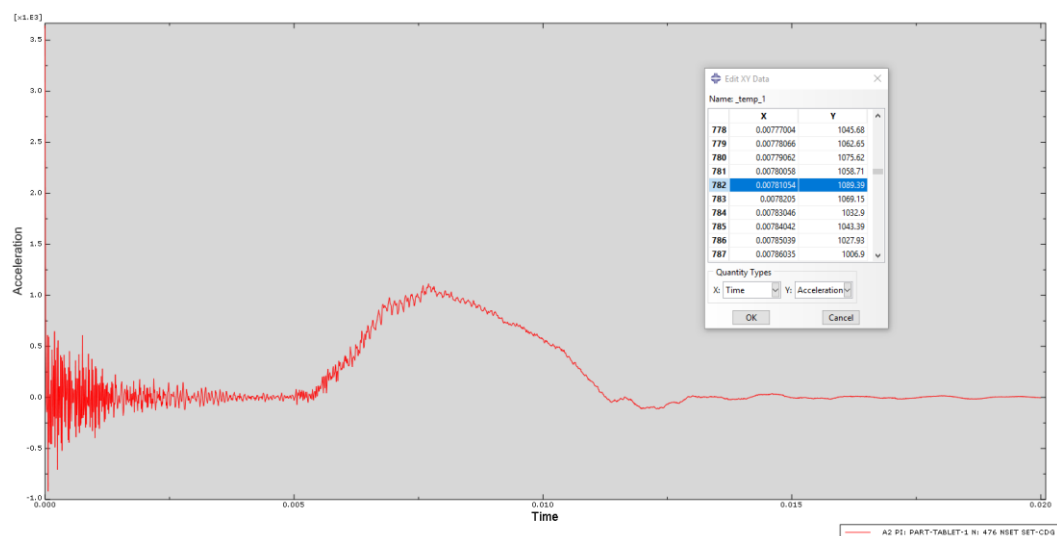


Ilustración 50: Variación de la aceleración con una presión interna de 20000 Pa .

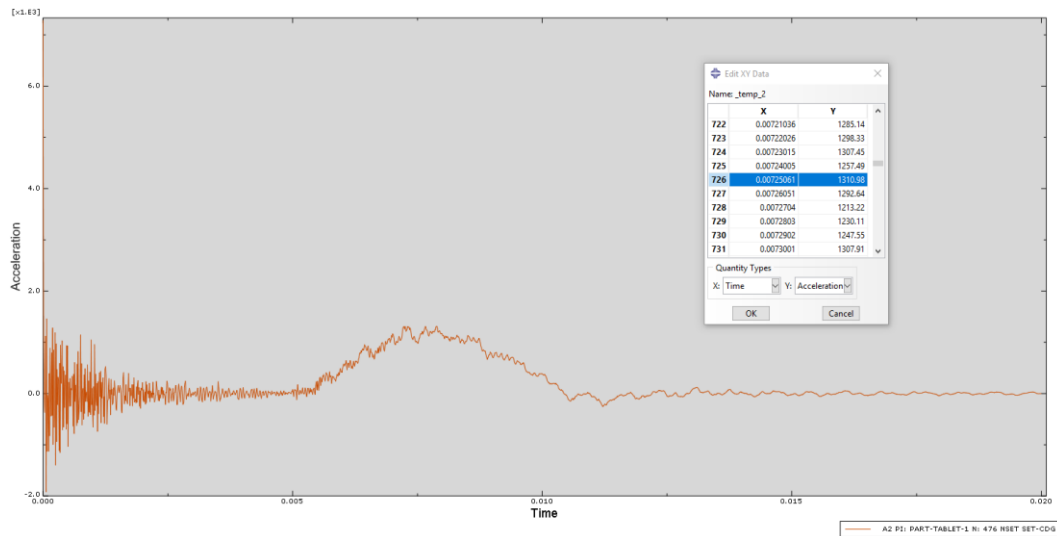


Ilustración 51: Variación de la aceleración con una presión interna de 40000 Pa.

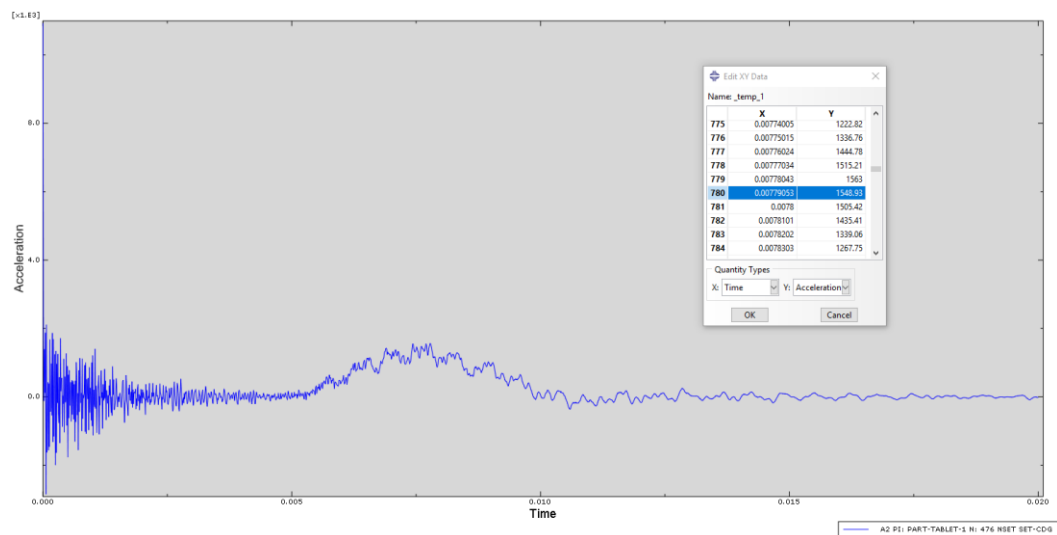


Ilustración 52: Variación de la aceleración con una presión interna de 60000 Pa.

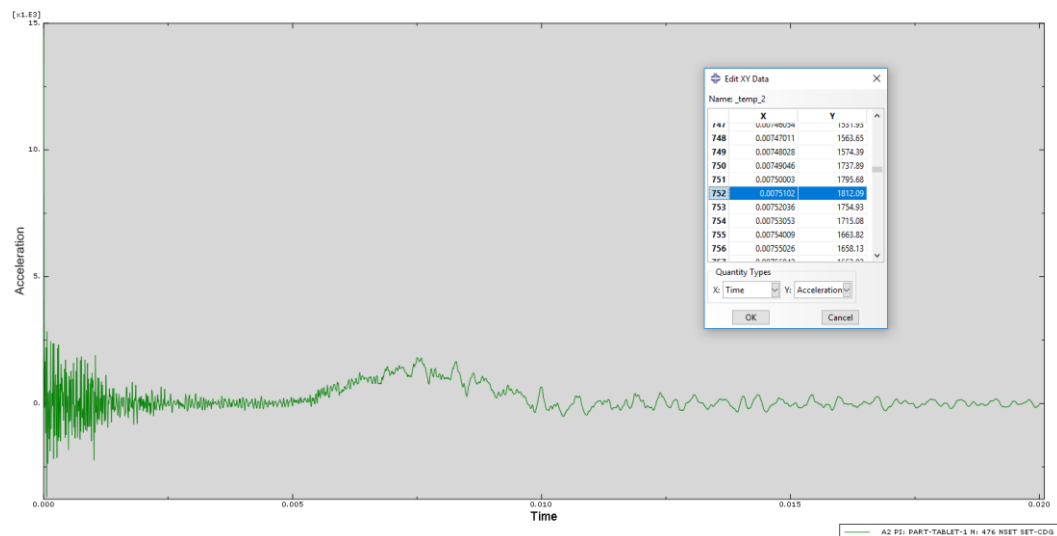


Ilustración 53: Variación de la aceleración con una presión interna de 80000 Pa.

<i>Presión Interna (Pa)</i>	<i>Aceleración máxima (m/s²)</i>
5000	759.214
10000	924.75
20000	1089.39
40000	1310.98
60000	1548.93
80000	1812.09

Tabla 10: Resumen de la variación de la aceleración máxima respecto a la presión interna del airbag.

Observando los resultados se pueden obtener 2 conclusiones:

1. Al aumentar la presión interna aumenta el pico de aceleración. En un principio se puede esperar que al aumentar la presión interna aumentaría la consistencia de los airbags y conseguir que su deformación sea menor, esto se cumple, sin embargo, la tensión que se produce en el impacto es mucho mayor por lo que la aceleración máxima crece considerablemente.
2. Teniendo en cuenta el punto anterior y observando el comportamiento de la aceleración de las ilustraciones, con presiones altas la duración del impacto y la pendiente de la curva de tendencia es mucho menor que con presiones bajas. Es decir, con presiones bajas el airbag absorbe más energía, por lo que las tensiones en la Tablet disminuyen.

Por lo tanto, la presión interna óptima para este tipo de airbags sería de unos 20000 Pa, si bien no conseguimos que el pico de aceleración sea el menor, al utilizar presiones iguales o mayores de 40000 Pa, el análisis de sensibilidad del mallado, que se verá a continuación, se ve entorpecido debido a que la superficie de contacto entre el airbag y la Tablet es menor y de menos tiempo, esto hace que para poder observar cambios mínimos en la aceleración tendríamos que utilizar tamaños de elementos muy pequeños.

Entonces, ¿porqué 20000 y no 5000 Pa?, la razón es que 5000 Pa se aleja mucho de la realidad y, aunque sea un trabajo de simulación, hay que tener siempre en cuenta los datos empíricos y no alejarnos demasiado de estos.

5.7.2 Variación del tamaño de elemento del mallado de los airbags.

Una de las preguntas frecuentes en el análisis de los resultados en un problema de elementos finitos es si los resultados dependen de la malla. Para comprobarlo hay que realizar un análisis de la sensibilidad de la malla variando el tipo de elementos o el tamaño de elemento usado y ver cómo influye en los resultados fijándonos en una variable global (aceleración, desplazamiento, tensión, etc.).

En este trabajo se hace el estudio variando solo el tamaño del elemento en el mallado del airbag, el resto de las propiedades del mallado son iguales y su presión interna es de 10000 Pa, el utilizado para todos los modelos.

Este análisis se lleva a cabo mediante un gráfico de dispersión donde se compara el número de elementos del sistema de airbags con la aceleración máxima alcanzada en el nodo que habíamos definido como centro de gravedad. Hay que tener en cuenta que al número de elementos totales hay que restarle los 408 elementos de la Tablet y, el modelo utilizado es

el modelo final, ya que en un modelo con malos resultados la diferencia de aceleraciones no se puede apreciar debido a que el sistema no cumple de forma aceptable con la función de proteger.

<i>Seed</i>	<i>Elementos</i>	<i>Ac. máxima</i>
0.1	1960	1879
0.03	2250	1149
0.01	3690	1200
0.008	5800	1082
0.006	10120	924
0.005	14120	829
0.004	21230	742
0.003	38270	709
0.0025	52720	495
0.002	83330	487
0.0017	114730	460

Tabla 11: Variación del pico de aceleración respecto al tamaño y número de elementos del mallado.

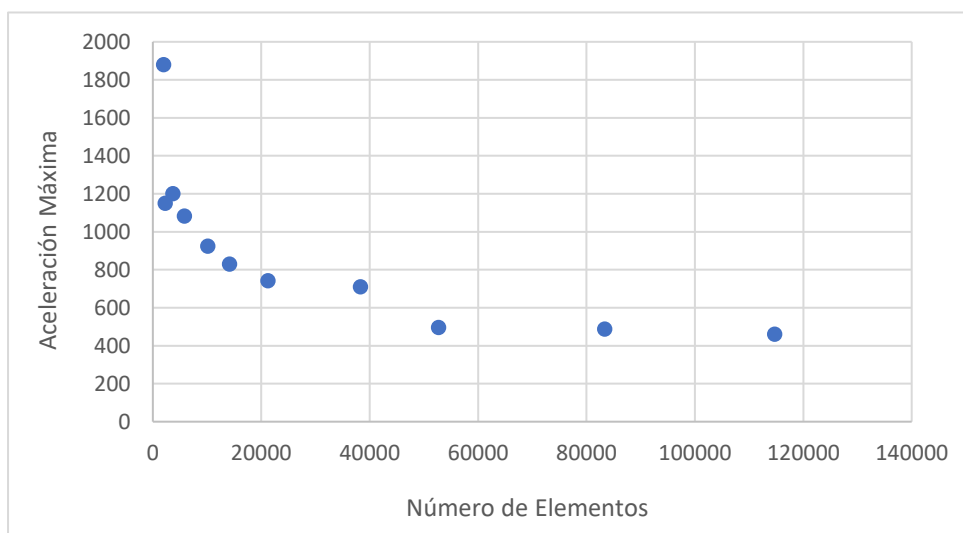


Ilustración 54: Análisis de la sensibilidad de la malla.

Como se puede apreciar del gráfico, a partir de unos 50000 elementos la aceleración máxima apenas varía, sin embargo, a mayor número de elementos mayor será el tiempo de computación, por lo que asignar “seeds” muy pequeñas no compensa para la obtención de resultados ligeramente mejores.

En este caso la “seed” óptima es de 0.0025 aproximadamente, con el cual se ha podido reducir el pico de aceleración del modelo inicial a casi la mitad.

Cabe destacar que, si aplicamos este análisis de sensibilidad a airbags con presiones internas de 20000 Pa, la proporción de la reducción del pico de aceleración es menor que con 10000 Pa. Si se observa la Ilustración 55, la aceleración máxima para presiones internas de 20000 Pa es de 751 m/s^2 , por lo tanto, la proporción de reducción es de $1 - (751/1089) = 0.31$, mientras que para airbags con presión interna de 10000 Pa es de 0.47, es una diferencia considerable y que aumenta a medida que se aumenta la presión interna. Como se vio en el

apartado anterior, esta es la razón por la cual no se utiliza presiones de 40000 Pa o superiores.

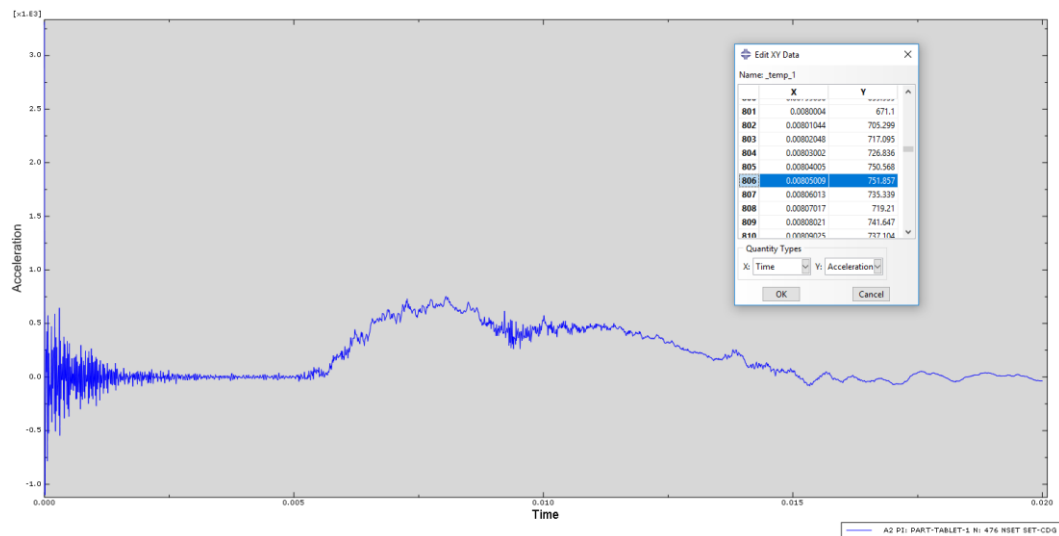


Ilustración 55: Variación de la aceleración utilizando 20000Pa y 0.0025 de seed.

Este rango también varía según el tipo de airbags que utilicemos, si son más grandes o más complejos el número de elementos para obtener resultados óptimos es mucho mayor.

5.7.3 Variación de la altura de caída.

Para este análisis se toman medidas de la aceleración máxima respecto a la altura de caída del sistema de 0.01, 0.02 y 0.04m.

Altura (m)	Aceleración máxima (m/s ²)
0.01	751.857
0.02	703.678
0.04	720.38

Tabla 12: Valores de la aceleración máxima respecto a la altura de caída.

Como era de esperar, el pico de aceleración apenas varía con la altura de caída, ya que, si mantenemos la velocidad de caída constante, lo normal es que no varíe, aunque lo tirásemos de 10m de altura. Como se observa en la Ilustración 56, la velocidad es constante hasta que el cuerpo inicia el impacto contra el suelo, durante toda la fase del choque, la velocidad crece de forma gradual hasta que termina el contacto, al estabilizarse se observa que la aceleración continua de forma constante, indicio de que no existen fuerzas externas en el sistema de cargas.

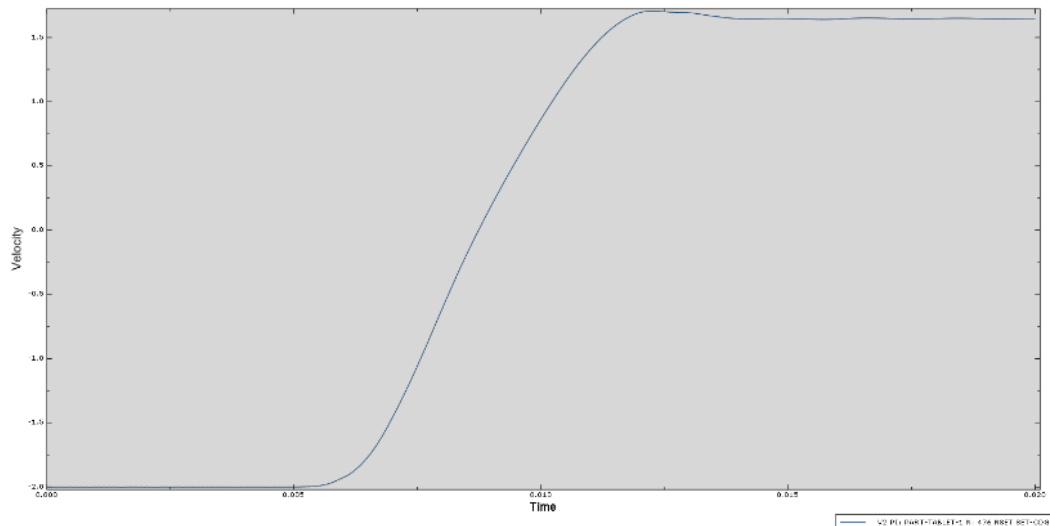


Ilustración 56: Variación de la velocidad del modelo final.

Esto, debido a la aceleración de la gravedad, en la realidad no pasa, pero simular un aumento progresivo de la velocidad complicaría más la simulación; es por esta razón por la que se elige 2 m/s, velocidad considerable y que se asemeja bastante a la velocidad final con la que impactaría este sistema en una caída libre de medio a 1m de altura.

5.7.4 Análisis de un impacto lateral.

El objetivo de este apartado es corroborar la suposición que se hizo en el apartado 4.4, sobre que la parte lateral de la Tablet es más robusta, por lo que debería aguantar mejor el impacto que la parte frontal.

Para ello se ha diseñado airbags laterales del mismo tipo y misma forma, la diferencia es que el área de contacto entre el airbag y la Tablet es mucho menor y que el punto de análisis ya no es en el centro de la Tablet sino en el lateral, donde ocurre el impacto.

El resultado obtenido tras la simulación es el siguiente:

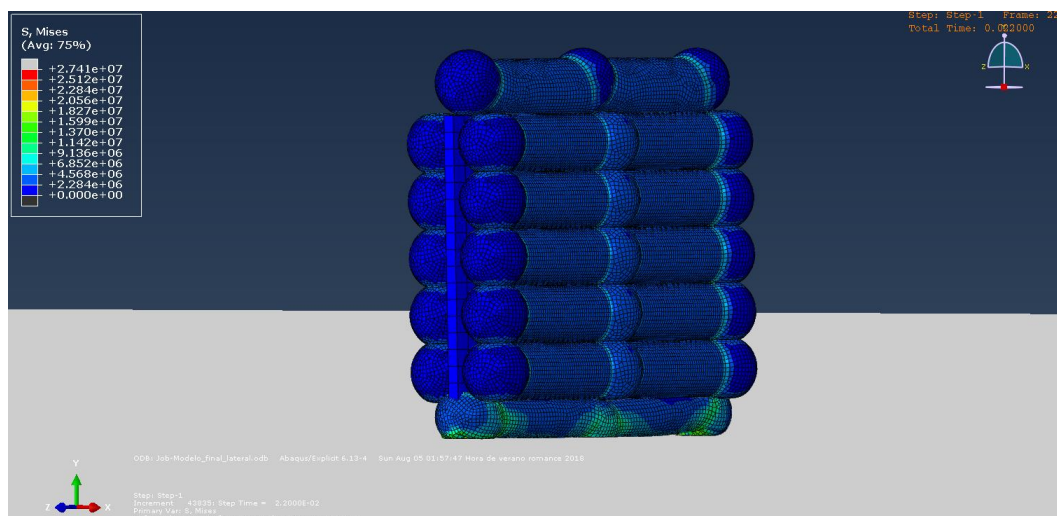


Ilustración 57: Momento crítico del impacto lateral del modelo final.

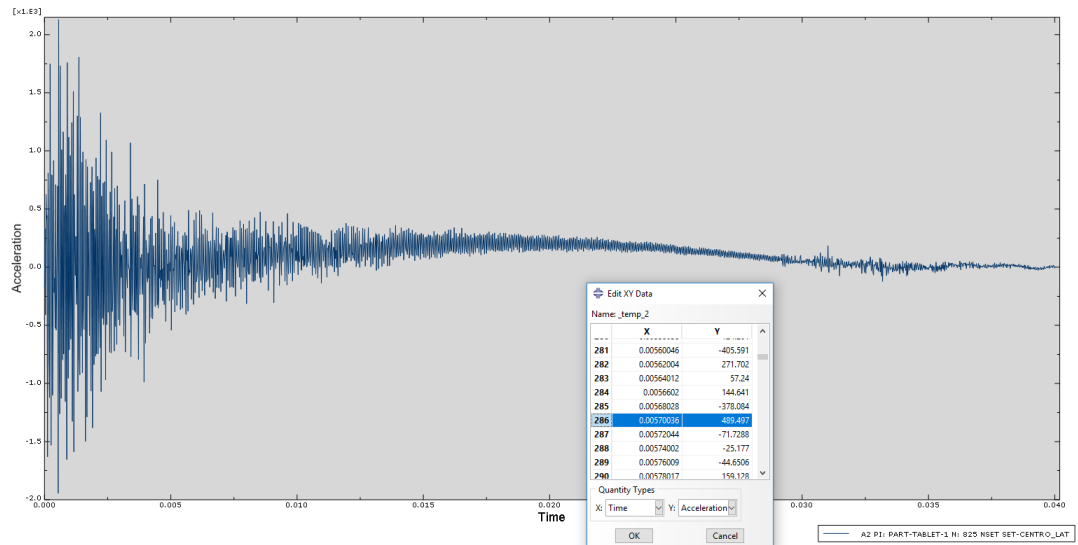


Ilustración 58: Variación de la aceleración en el impacto lateral del modelo final.

Antes de analizar los resultados hay que comentar 2 aspectos, primero que el impacto dura mucho más, por lo que el tiempo de simulación se alargó a 0.04s para poder observar el impacto en su totalidad. Y segundo, en la gráfica de la aceleración hay que observar los datos a partir de 0.005s que es cuando inicia el impacto, ya que como se explicó en el apartado 5.2 la variación de aceleración del principio no es real.

Por lo tanto, con un pico aproximado de aceleración de 500 m/s^2 , se confirma que, en la superficie lateral, la Tablet sufre mucho menos que en la superficie frontal en un impacto similar, esto es gracias a que el airbag se deforma mucho más y absorbe más la energía del impacto de lo que lo hacen los airbags en un choque frontal. Al igual que se pudo observar en el apartado 5.7.1, con presiones bajas el pico de aceleración disminuía, y es debido a que los airbags se deforman más, absorbiendo mucha más energía durante más tiempo.

6. Presupuesto

En este apartado se detalla una aproximación al coste total de realización de este proyecto como un proyecto comercial cuyo presupuesto va separado en tres estimaciones de costes:

1. **Coste asociado al alumno:** el Trabajo de Fin de Grado consta de 12 créditos por lo que son un aproximado de 320 horas de dedicación en la realización de este. Según los datos de los últimos doce meses, el sueldo promedio de un ingeniero junior en la Comunidad de Madrid ronda los 25.500 € anuales, siendo el coste/hora de 13,3 €/h. [27]

Aplicando una sencilla multiplicación obtenemos que, el coste asociado al alumno es de unos 4.256 €.

2. **Coste asociado al tutor:** este coste engloba tanto las horas de tutorías, así como las horas de dedicación del profesor preparando las clases de tutoría, respondiendo correos, etc.; siendo un total de 30 horas aproximadas.

El coste por hora estimado por la UC3M de un catedrático de universidad es de 56,26 €/h, este coste es a fecha de 2011 por lo que hay que aumentarlo a razón de un 2% anual, para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$C/h_{2018} = 56,26 \cdot 1.02^7 = 64,62 \text{ €/h}$$

De esta forma el coste sería de 1.938,6 €, a este coste hay que añadir un 15% de costes generales de la Universidad, y a todo ello el 18% de IVA incluido en la realización de proyectos de investigación. [28]

Por lo tanto, el coste total asociado al tutor sería de 2.630,68€.

3. **Coste asociado a la licencia de Abaqus:** renovar una licencia comercial de Abaqus cuesta en torno a 13.000 € anuales, como la realización del proyecto se llevó a cabo en aproximadamente 4 meses, realizando una operación simple se obtiene que el coste total asociado a la licencia sería de 4.333 €.

Finalmente, sumando el coste de las partes asociadas, el resultado es de un total de **11.219,68 €** de presupuesto en la realización de este proyecto.

7. Entorno socioeconómico.

Como se vio en los antecedentes, los sistemas de empaquetamiento forman una parte bastante importante en la industria moderna. Las empresas que se dedican a su fabricación deben mantener un equilibrio entre los gastos de producción y el nivel de calidad del producto, teniendo en cuenta las medidas medioambientales a tomar para cumplir con las leyes y satisfacer a una sociedad que cada vez es más consumista.

La degradación de los materiales es el primer paso para la reincorporación de sus componentes al medio natural, para que un material sintético se reincorpore de forma completa al medioambiente requiere de condiciones especiales y de mucho tiempo. Es por esto por lo que la contaminación de los suelos y aguas se aceleran por el uso indiscriminado de envases y una mala función de recogida y procesado por parte del sistema consumista.

<i>Producto</i>	<i>Tiempo</i>
Papel	2 a 4 semanas
Hojalata	100 años
Bolsas de plástico	100 a 200 años
Botellas y envases de plástico	100 a 1000 años
Vidrio	4000 años

Tabla 13: Tiempo aproximado para la degradación de los materiales para envasar.

Para cada país existen leyes de obligado cumplimiento y normas de carácter recomendatorio que aumentan la conformidad del producto. En los años 1980 la Unión Europea adoptó unas leyes para la prevención y disminución de los residuos que provocan los envases y embalajes. En España y otros países de la UE, las leyes medioambientales parte del principio “el que los crea, lo paga”, es decir, la responsabilidad recae sobre las empresas que lo producen, debido a esto las empresas empezaron a crear campañas para recoger, almacenar y tratar los envases que producen a través de impuestos especiales en las ciudades, divulgación de información y educación medioambientalista entre los ciudadanos. Además, las autoridades de las localidades tienen reglamentos especializados y también realizan campañas para recoger y tratar los residuos de los envases y embalajes.

En general, las leyes medioambientalistas europeas se basan en 4 principios básicos:

1. **Reducción de origen:** es decir, desde antes de la fabricación, minimizando los recursos eliminando el material innecesario, y eliminando los materiales contaminantes como colorantes, tintas, aerosoles y algunos plásticos que pueden contaminar el producto.
2. **Reciclado:** lo comprende actividades como la utilización de materiales reciclados, utilizar el mínimo material necesario para elaborar los envases, y diseñar envases de fácil desarmado o descomposición para su reutilización.
3. **Reutilización:** esto puede ser incorporando de nuevo el envase al circuito comercial, vender envases que se puedan utilizar varias veces o que necesiten de un recambio para poder empaquetar de nuevo un producto con el mismo envase. También se puede optar la medida de reutilizar el envase como materia prima de otros productos.
4. Si no es posible realizar el **Reciclado** o la **Reutilización** se opta por desecharlo a un contenedor o basurero como medida final. [5]

8. Conclusiones y trabajos futuros

8.1 Conclusiones

En cuanto a los **antecedentes** y la **metodología**, se ha conseguido el objetivo propuesto de aprender más sobre estos, sobre todo la importancia que tienen los airbags de polietileno para empacar en la sociedad moderna, y el uso del MEF para modelar y simular.

Sobre el **proceso de diseño y simulación**, hay que mencionar que diseñar un modelo funcional requiere de mucho tiempo, sobre todo si la cantidad de airbags es elevada, y de mucha precisión en las dimensiones para que no exista errores en la simulación. Por ello se recomienda trabajar antes sobre el papel las ideas para el diseño del modelo y, una vez realizada la simulación, si esta no cumple con las expectativas, modificar pequeños valores de los parámetros hasta obtener resultados mejores.

Se ha podido comprobar que el Polietileno de alta densidad, material utilizado en los airbags, cumple con su función sin problemas, siendo las tensiones de Von Mises máximas de todos los modelos menores de 30 MPa, tensión que supone menos del 30% de la resistencia a rotura del HDPE establecida en 1 GPa.

En cuanto a los **resultados** obtenidos en este trabajo, analizando sobre la variación de la aceleración en los diferentes modelos, se ha podido comprobar que los airbags con forma esférica ofrecen mayor estabilidad que los cilíndricos, sin embargo, los airbags con forma de cilindro son capaces de distribuir mejor las tensiones que produce el choque, consiguiendo disminuir aún más el pico de aceleración de lo que los airbags esféricos lo hacen.

Otro factor importante que determina el resultado es el tamaño y el número de airbags que se utilicen para el modelo, gracias al cuarto y quinto modelo, se pudo comprobar que usar airbags de gran tamaño mejora considerablemente el resultado respecto al uso de un mayor número de airbags de tamaño reducido.

Otro factor que influye en el resultado es la presión interna de los airbags que, al ser airbags de pequeño tamaño, con presiones menores el airbag se deforma considerablemente absorbiendo mayores valores de tensión producida por el impacto, sin embargo, hay que tener cuidado de no usar presiones demasiado bajas porque podría provocar un contacto directo entre el objeto que se quiere proteger y la superficie de impacto.

Así como los anteriores factores, el tamaño del elemento de la malla también influye en los resultados obtenidos, a mayor número de elementos (menor tamaño individual) menor es el pico de aceleración que provoca el impacto, es decir, las tensiones son menores, sin embargo, hay un punto en el cual el número de elementos deja de influir en el resultado y lo único que hace es aumentar los tiempos de simulación.

Por último, cabe destacar que al ser este un trabajo de modelado, no existen referencias experimentales sobre el impacto de un sistema similar al planteado en el trabajo, por esta razón no se puede saber si los resultados obtenidos se asemejan a la realidad o si son los más óptimos, sin embargo, se han utilizado parámetros en el diseño que se acercan a la realidad y, el hecho de que los modelos den resultados de mejora indica que se está trabajando de forma correcta.

8.2 Trabajos futuros

La propuesta de trabajos futuros sigue la línea de este trabajo. Sería interesante utilizar el sistema de airbags en un simulado de impacto de otro tipo de aparato electrónico como por ejemplo un ordenador portátil, un monitor o televisor, una consola de videojuegos o incluso en objetos frágiles de uso doméstico como la cubertería, vasos y botellas de cristal.

Otra propuesta es el de utilizar diferentes tipos de materiales, a parte del HPDE, en la elaboración de los airbags, el látex es interesante por su costo, aunque ofrezca peor resistencia a la perforación. Para cargas pesadas haría falta una mayor resistencia, por lo que utilizar Rafia (material que sustituye al yute) reforzado con Polipropileno sería una buena opción. Otra alternativa interesante, es el de utilizar una película de material compuesto que utilice el papel como base con polímeros como refuerzo, esto ofrecería mayor resistencia con tiempos de procesado ligeramente mayores y costes moderados.

Para terminar, en cuanto a la simulación mediante Abaqus, una propuesta es la de seguir modificando la geometría de los airbags, no tienen por qué ser geometrías complicadas o estrafalarias porque dificultaría demasiado en una supuesta fabricación de estas, sin embargo, conseguir geometrías precisas y de mayor eficiencia sigue siendo un objetivo. Continuando con la simulación, analizar otros tipos de impactos, como el de un objeto punzante que choca con la superficie del airbag, interesa ya que se obtendrían detalles avanzados sobre su resistencia a la perforación.

9. Referencias bibliográficas

- [1] M. R. M. Farland, *Diseño gráfico de envases: guía y metodología*, México D.F: Universidad Iberoamericana, Cap. 1, 1996.
- [2] Claudio, "HISTORIA DEL PAPEL Y SU FABRICACIÓN, CRONOLOGÍA DE SU EVOLUCIÓN", *Historias y Biografías HB* 11-09-2014. [En línea]. Disponible en: https://historiaybiografias.com/el_papel/.
- [3] S/N, "El Envase de Vidrio: Una historia moldeada con Fuego y Arena", *Historias de Empaques*, 27-01-2013. [En línea]. Disponible en: <https://historiasdeempaques.wordpress.com/2013/01/27/el-envase-de-vidrio-una-historia-moldeada-con-fuego-y-arena/>.
- [4] S/N, "El Envase de Hojalata: Nace por la necesidad de alimentar las tropas y los exploradores", *Historias de Empaques*, 21-03-2013. [En línea]. Disponible en: <https://historiasdeempaques.wordpress.com/category/metalicos/>.
- [5] J. C. Ospina Arias, *Fundamentos de Envases y Embalajes*, Barranquilla, Colombia: Ed. SENA, Cap.1, 3 y 6, 2015. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/11404/2526/1/fundamentos_envases_embalajes.pdf
- [6] S/N, "Reciclaje de aluminio", *Wikipedia*, Última actualización: 07-09-2018. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Reciclaje_de_aluminio.
- [7] S/N, "Breve historia de los envases plásticos", *Arapack*, 01-12-2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.arapack.com/breve-historia-los-envases-plasticos/>.
- [8] S/N, "El Nylon", *Historias de Empaques*, 04-05-2014. [En línea]. Disponible en: <https://historiasdeempaques.wordpress.com/2014/05/04/el-nylon/>.
- [9] S/N, "El Poliestireno", *Historias de Empaques*, 04-03-2014. [En línea]. Disponible en: <https://historiasdeempaques.wordpress.com/2014/03/04/el-poliestireno/>.
- [10] S/N, "El Polietileno", *Historias de Empaques*, 30-08-2014 . [En línea]. Disponible en: <https://historiasdeempaques.wordpress.com/category/plasticos/>.
- [11] D. L. Tirado Ariza, "Empaques plásticos: innovación y sostenibilidad", *Tecnología del Plástico*, Febrero de 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.plastico.com/temas/Empaques-plasticos,-innovacion-y-sostenibilidad+110566?pagina=2>.
- [12] S/N, "Inflatable air cushion", *Wikipedia*, Última actualización: 18-02-2018. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Inflatable_air_cushion.
- [13] D. A. Pharos, "Inflatable package insert". Patente US5445274A, 29 de agosto, 1995.
- [14] W. A. Peper, "One-way valve for inflatable package". Patente US6913803B2, 16 de noviembre, 2001.

- [15] D. Varas Doval, "Tema 9: Métodos de resolución de las ecuaciones de la elasticidad", Documentación de Elasticidad, Dpto. de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2014.
- [16] S/N, "Introduction to Finite Element Modeling". Universidad de California en Berkeley, California, EE.UU. [En línea]. Disponible en: <http://lwin.me.berkeley.edu/me128/FEMNotes.pdf>.
- [17] O. C. Zienkiewicz y R. L. Taylor, *El Método de los Elementos Finitos: Mecánica de Sólidos*, Sexta ed., vol. 2, Oxford, UK: Ed. CIMNE, Cap. 1 y 2, 2005.
- [18] J. Zahr Viñuela, "Tema 7: Cuadratura de Gauss", Documentación de Modelización Numérica de Elementos Estructurales, Dpto. de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2015.
- [19] J. Zahr Viñuela y J. De Lamo Arango, "Tema 3.7: Métodos numéricos en plasticidad", Documentación de Mecánica de Sólidos, Dpto. de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2014.
- [20] S/N, "FEM Modeling: Introduction". Universidad de Colorado, Colorado, EE.UU. [En línea]. Disponible en: <https://www.colorado.edu/engineering/CAS/courses.d/IFEM.d/IFEM.Ch06.d/IFEM.Ch06.pdf>.
- [21] S/N, "ABAQUS UNIFIED FEA", BS Dassault Systems. [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/abaqus/>.
- [22] S/N, "HIGH-DENSITY POLYETHYLENE FILMS", Polymer Properties Database, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://polymerdatabase.com/Films/HDPE%20Films.html>.
- [23] P. Gómez Zarza, "Cápsula prismática pentagonal para el aterrizaje de un astromóvil de exploración. Optimización del sistema de airbags", Trabajo Fin de Grado, Dpto. de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10016/26656>
- [24] S/N, "Significance of Energies in FE Simulation – Part 1" *OPTIMEC CONSULTANTS*. [En línea]. Disponible en: <http://optimec.ca/news/significance-of-energies-in-fe-simulation-part-1/>.
- [25] S/N, "Primer principio de la termodinámica (GIE)", *Wiki*, Dpto de Física Aplicada III, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2017. [En línea]. Disponible en: [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Primer_principio_de_la_termodin%C3%A1mica_\(GIE\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Primer_principio_de_la_termodin%C3%A1mica_(GIE)).
- [26] PACK BEST, "Air bubble cushion wrap inflatable rolls bag packaging/air column sheet/air buffer roll", Alibaba.com Global trade starts here.™. [En línea]. Disponible en: https://www.alibaba.com/product-detail/Air-bubble-cushion-wrap-inflatable-rolls_60774630691.html?spm=a2700.7724857.normalList.41.477a249fCmj6Eq.
- [27] S/N, "El nivel del salario promedio en los últimos 12 meses: Ingeniero Junior en España", *JobTonic.es*, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://espana.jobtonic.es/salary/26526/74925.html>.

- [28] S/N, "Guía para la Preparación de un Presupuesto", *Universidad Carlos III de Madrid: Campus Global*, Última actualización: 13/02/2013. [En línea]. Disponible en:
http://portal.uc3m.es/portal/page/portal/ugi_cg/pdi_gestion/guia_preparacion_presupuesto.
- [30] J. Hernaiz Mendez-Peñalosa, "Estudio y análisis del sistema de airbags para el aterrizaje de una cápsula tetraédrica", Trabajo Fin de Grado, Dpto. de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2017. [En línea]. Disponible en:
<http://hdl.handle.net/10016/26654>